

3100097008806

**STUDI TENTANG
APLIKASI TEKNIK MULTIPLEKS CDMA
DALAM SISTEM KOMUNIKASI SERAT OPTIK**

TUGAS AKHIR

Oleh :

KHAIRUL MUNADI

NRP. 2902201508

RSE

621 382 75

Mun

S-1

1996



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
1996**

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	15 JAN 1997
Terima Dari	H

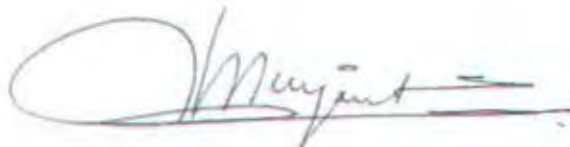
**STUDI TENTANG APLIKASI
TEKNIK MULTIPLEKS CDMA
DALAM SISTEM KOMUNIKASI SERAT OPTIK**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
Pada**

**Bidang Studi Teknik Telekomunikasi
Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya**

**Mengetahui/Menyetujui
Dosen Pembimbing**



(DR. Ir. AGUS MULYANTO, M.Sc.)
NIP. 130 422 813

SURABAYA

JULI, 1996

ABSTRAK

Aplikasi serat optik sebagai media transmisi dalam sistem komunikasi dewasa ini telah berkembang sangat pesat. Keunggulan-keunggulan dari serat optik dibandingkan dengan media transmisi lainnya adalah : kapasitas kanal yang sangat besar, redaman yang sangat rendah dan ukuran fisiknya yang kecil dan amat ringan. Dengan memanfaatkan teknik multipleks, kapasitas kanal serat yang besar dapat dipakai untuk menyalurkan informasi secara simultan dalam jumlah yang besar pula. Salah satu metode multipleks yang baru dikembangkan untuk sistem komunikasi serat optik adalah teknik *optical Code Division Multiple Acces* (*optical CDMA*).

Tugas akhir ini membahas tentang aplikasi teknik multipleks CDMA dalam sistem komunikasi serat optik. Akan dikaji keandalan dari teknik *optical CDMA*, dan dibandingkan dengan teknik multipleks yang lebih dulu berkembang. Pembahasan dibatasi pada aspek prinsip operasi dan penampilam sistemnya saja, bukan pada konfigurasi perangkat keras yang dipakai.

Penyusunan tugas akhir ini lebih bersifat studi pustaka, yang pembahasannya didapat dari kajian dan analisa pelbagai literatur, terutama dari jurnal-jurnal ilmiah. Secara umum, pembahasan dikelompokkan menjadi beberapa bagian, yaitu : unsur-unsur teknis *optical CDMA* dan aplikasi teknik multipleks CDMA dalam sistem komunikasi serat optik yang meliputi beberapa jenis *optical CDMA* yang mulai dikembangkan -*optical orthogonal codes CDMA* (OOC CDMA), *random carrier CDMA* (RC CDMA), *bipolar codes CDMA* (BC CDMA), dan *pulse position modulation CDMA* (PPM CDMA).

Dari tugas akhir ini dapat disimpulkan, bila dibandingkan dengan teknik-teknik multipleks untuk sistem komunikasi serat optik yang telah ada, seperti TDM-PCM, SDM, FDM dan WDM, *optical CDMA* memiliki beberapa keunggulan, antara lain : pengaksesan dapat secara asinkronus dan random, kecepatan data tinggi, jaminan sekuriti yang lebih baik dan kemampuan dalam menampung banyak *user*. Dari beberapa teknik *optical CDMA* yang dibahas, penampilan sistem terbaik -diwakili oleh *probability of error*-nya (PE)- yang diberikan masing-masing sistem adalah : OOC CDMA dengan PE sekitar 10^{-10} , RC CDMA dengan PE mencapai 10^{-8} , BC CDMA dengan PE antara 10^{-5} - 10^{-13} dan PPM CDMA memiliki PE sekitar 10^{-6} . Kemampuan menampung banyak *user* dalam jaringan diperlihatkan oleh RC CDMA, di mana dengan PE sekitar 10^{-8} mampu menampung hingga 17000 *user* aktif.

KATA PENGANTAR

Puji syukur dipanjatkan ke hadirat ALLAH SWT atas Rahmat dan Karunia-Nya sehingga penulis dapat merampungkan tugas akhir ini yang berjudul :

STUDI TENTANG

APLIKASI TEKNIK MULTIPLEKS CDMA

DALAM SISTEM KOMUNIKASI SERAT OPTIK

Tugas akhir ini disusun guna memenuhi salah satu persyaratan akademis untuk memperoleh gelar sarjana teknik pada bidang studi Telekomunikasi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember di Surabaya.

Semoga tugas akhir ini bisa memberikan manfaat bagi kita semua, khususnya di lingkungan Bidang Studi Telekomunikasi, Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS Surabaya.

Surabaya, 23 Juli 1996

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini, penulis banyak mendapat dukungan dari berbagai pihak, baik berupa dukungan moral maupun material. Untuk itu penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sedalam-dalamnya, kepada :

1. Yang tercinta **Ibunda Mariani dan Ayahanda Drs. Anwar Hamzah** yang telah membesarkan penulis dengan penuh perhatian dan kasih sayang. Tak lupa adik-adik tersayang, **Zikra Hidayat, Ibnu Azam, Abya Ihsan, Shafrina dan Fauzan** yang selalu menanti Bang Di pulang.
2. **Dr. Ir. Agus Mulyanto, M.Sc.**, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan dalam penyelesaian tugas akhir.
3. **Dr. Ir. Moch. Salehudin, M.Eng.Sc.**, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, FTI-ITS.
4. **Ir. Wirawan**, selaku dosen wali yang banyak membantu dan membimbing penulis selama tahap persiapan hingga tahap madya.
5. **Ir. M. Aries Purnomo**, selaku dosen wali penulis selama tahap sarjana.
6. Adeknya Bang Mun tersayang, **Fitri Arnia**, yang dengan tulus dan penuh kasih terus-menerus mendorong Abang untuk menyelesaikan tugas akhir. Juga pembaca setia "Catatan-catatan di Pintu Hati".

7. Seluruh **Bapak dan Ibu Dosen** Jurusan Teknik Elektro ITS, yang telah banyak membekali penulis dengan berbagai pengetahuan selama menempuh studi.
8. Semua **warga B-301** yang dengan canda dan tawanya telah menemani penulis selama mengerjakan tugas akhir.
9. Sahabatku **Ivan** yang telah banyak membantu.
10. Rekan-rekan di Gebang Putih 14, kita semua senasib dan sepenanggungan.
11. Semua rekan di UK Catur, yang telah memberikan kesempatan penulis untuk belajar berorganisasi.
12. Seluruh karyawan dan karyawan Jurusan Teknik Elektro ITS.
13. Semua pihak yang telah membantu yang belum penulis sebutkan.

Semoga semua kebaikan tersebut mendapat balasan yang setimpal dari Allah, Amin.

DAFTAR ISI

BAB	Hal
JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xvi
 BAB I. PENDAHULUAN	 1
I. 1. Latar Belakang	1
I. 2. Permasalahan	2
I. 3. Batasan Masalah	3
I. 4. Metodologi	3
I. 5. Sistematika Pembahasan	4
I. 6. Tujuan	4
I. 7. Relevansi	5

BAB II. TEORI PENUNJANG	6
II.1. Umum	6
II.2. Teori Dasar Sistem Komunikasi Serat Optik	6
II.2.1. Diagram Blok Sistem Komunikasi Serat Optik	7
II.2.2. Macam-macam Serat Optik	8
II.2.2.1. Single Mode Fiber	9
II.2.2.2. Step Index Fiber	11
II.2.2.3. Graded Index Fiber	12
II.2.3. Sumber Optik	16
II.2.4. Detektor Optik	20
II.2.5. Teknik Modulasi dalam Sistem Komunikasi Serat Optik	24
II.2.6. Teknik Multipleks dalam Sistem Komunikasi Serat Optik	24
II.2.6.1. TDM-PCM	25
II.2.6.2. FDM	26
II.2.6.3. SDM	28
II.2.6.4. WDM	28
II.2.6.5. Optical CDMA	29
II.2.7. Perbandingan Berbagai Teknik Multipleks dalam Sistem Komunikasi Serat Optik	30
II.3. Teori Dasar CDMA	34
II.3.1. Code Division Multiple Access (CDMA)	34
II.3.2. Direct Sequence CDMA	36

II.3.2.1. Pemancar Direct Sequence	37
II.3.2.2. Penerima Direct Sequence	37
II.3.3. Frequency Hopping CDMA	39
II.3.3.1. Pemancar Frequency Hopping	39
II.3.3.2. Penerima Frequency Hopping	41
 BAB III. UNSUR-UNSUR TEKNIS OPTICAL CDMA	 43
III.1. Umum	43
III.2. Model Optical CDMA	43
III.3. Jenis-jenis Kode Optical CDMA	45
III.3.1. Kode Optik Ortogonal (Optical Orthogonal Code)	46
III.3.1.1. Sifat-sifat Fundamental dari Kode Optik Ortogonal	46
III.3.2. Kode Gold (Gold Code)	51
III.3.3. Kode Utama (Prime Code)	52
III.3.4. Perbandingan Kode-kode Optical CDMA	54
III.4. Encoder-Decoder Optical CDMA	55
III.4.1. Spectral Encoding-Decoding	56
III.4.1.1. Lebar Pulsa Minimum dan Lebar Pulsa Maksimum	58
III.4.1.2. Peak Power Pulsa Input Maksimum	60
III.4.1.3. Peak Power Pulsa Input Minimum	63
III.4.1.4. Ketaksejajaran Dekoder Maksimum	64
III.4.2. Fiber Optic Delay Line	66

BAB IV. APLKASI CDMA DALAM SISTEM KOMUNIKASI SERAT

OPTIK

70

IV.1. Umum

70

IV.2. Teknik-teknik Multipleks Optical CDMA

71

IV.3. Optical Orthogonal Codes CDMA (OOC CDMA)

72

IV.3.1. Prinsip Operasi

72

IV.3.2. Penampilan Sistem

74

IV.3.2.1. Probability Density Function

77

IV.3.2.2. Probability of Error

78

IV.3.2.3. Optical Hard Limiter

85

a. Probabilty Density Function

87

b. Probability of Error

89

IV.4. Random Carrier CDMA (RC CDMA)

95

IV.4.1. Prinsip Operasi

95

IV.4.2. Penampilan Sistem

99

IV.4.2.1. Modulasi dan Spreading

99

IV.4.2.2. Carrier Power to Noise Power Ratio (CNR)

100

IV.4.2.3. Chernoff Bound pada Outage Probability

101

IV.5. Bipolar Codes CDMA

103

IV.5.1. Prinsip Operasi

103

IV.5.2. Penampilan Sistem	108
IV.5.2.1. Probability Density Function	109
IV.5.2.2. Probability of Error	112
IV.6. Pulse Position Modulation CDMA (PPM CDMA)	116
IV.6.1. Prinsip Operasi	116
IV.6.2. Penampilan Sistem	121
IV.6.2.1. Probability of Error	123
IV.7. Analisa dan Perbandingan Teknik-teknik Multipleks Optical CDMA	129
 BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	 136
V.1. Kesimpulan	136
V.2. Saran	137

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR		Hal
1. GAMBAR 2.1	ELEMEN-ELEMEN DASAR SISTEM KOMUNIKASI SERAT OPTIK	8
2. GAMBAR 2.2	PENAMPANG MELINTANG DARI SINGLE MODE FIBER	10
3. GAMBAR 2.3	PENAMPANG STEP INDEX FIBER	12
4. GAMBAR 2.4	PROFIL SERAT GRADED INDEX	15
5. GAMBAR 2.5	DAYA OPTIK LED SEBAGAI FUNGSI ARUS	18
6. GAMBAR 2.6	DAYA OPTIK LASER SEBAGAI FUNGSI ARUS	18
7. GAMBAR 2.7	PEMANCAR DIRECT SEQUENCES	38
8. GAMBAR 2.8	SISTEM PENERIMA DIRECT SEQUENCES	38
9. GAMBAR 2.9	PEMANCAR FREQUENCY HOPPING	40
10. GAMBAR 2.10	PENERIMA NONKOHEREN FREQUENCY HOPPING	41
11. GAMBAR 3.1	SISTEM KOMUNIKASI SERAT OPTIK DENGAN OPTICAL CDMA ENCODER DAN DECODER	44
12. GAMBAR 3.3	DUA KODE OPTIK ORTOGONAL DENGAN $F=32$, $K=4$, $\lambda_s=\lambda_c=1$	48
13. GAMBAR 3.4	SPECTRAL ENCODING	57
14. GAMBAR 3.5	EFEK NONLINEARITAS SERAT OPTIK PADA PULSA TERKODE DENGAN PANJANG KODE=31	62
15. GAMBAR 3.6	EFEK NONLINEARITAS SERAT OPTIK PADA PULSA TERKODE DENGAN PANJANG KODE=127	62

16. GAMBAR 3.7	EFEK DARI KETAKSEJAJARAN ENCODING-DECODING MASK	65
17. GAMBAR 3.8	ENCODER DAN SEKUEN PULSA	67
18. GAMBAR 3.9	SISTEM CDMA DENGAN DELAY LINE	68
19. GAMBAR 3.10	LADDER ENCODER	69
20. GAMBAR 3.11	PASANGAN LADDER ENCODER-DECODER	69
21. GAMBAR 4.1	MODEL OOC CDMA DALAM KONFIGURASI BINTANG	72
22. GAMBAR 4.2	KORELATOR OPTIK IDEAL	76
23. GAMBAR 4.3	OPTICAL MATCHED FILTER	77
24. GAMBAR 4.4	BIT ERROR RATE VERSUS THRESHOLD (UPPERBOUND) UNTUK $N=20$, $K=5$, DAN $F=1000, 2000$	80
25. GAMBAR 4.5	BIT ERROR RATE VERSUS THRESHOLD (UPPERBOUND) UNTUK $N=20$, $F=1000$, DAN $K=1, 3, 5, 7, 9$	81
26. GAMBAR 4.6	BIT ERROR RATE VERSUS THRESHOLD (UPPERBOUND) UNTUK $F=1000$, $K=5$, DAN $N=50, 30, 10$	82
27. GAMBAR 4.7	BIT ERROR RATE VERSUS THRESHOLD (LOWERBOUND) UNTUK $N=10$, $F=1000$, DAN $K=1, 3, 5, 7, 9$	84
28. GAMBAR 4.8	PENERIMA DENGAN OPTICAL HARD LIMITER	86
29. GAMBAR 4.9	BIT ERROR RATE (UPPERBOUND) UNTUK $F=1000$, $N=10$ DAN $K=1, 3, 5, 7, 9$ DENGAN DAN TANPA MENGGUNAKAN HARD LIMITER	90
30. GAMBAR 4.10	BIT ERROR RATE (UPPERBOUND) VERSUS THRESHOLD UNTUK $N=50$, $K=5$, $N=30$, $K=6$ DAN $F=1000$ DENGAN DAN TANPA MENGGUNAKAN HARD LIMITER	91

31. GAMBAR 4.11	BIT ERROR RATE (UPPERBOUND) VERSUS THRESHOLD UNTUK $F=1000$, $K=5$, DAN $N=10, 50$ DENGAN DAN TANPA MENGGUNAKAN HARD LIMITER	92
32. GAMBAR 4.12	BIT ERROR RATE VERSUS THRESHOLD (LOWERBOUND) UNTUK $F=1000$, $K=5$, $N=10, 50$ DENGAN DAN TANPA MENGGUNAKAN HARD LIMITER	94
33. GAMBAR 4.13	OPTICAL FIBER DAN COUPLER	96
34. GAMBAR 4.14	TRANSMISI DARI SIMPUL J KE SIMPUL K	96
35. GAMBAR 4.15	SEKUEN PN YANG DIPAKAI PADA UNIT ENERGY PULSE	97
36. GAMBAR 4.16	SPEKTRUM SINYAL SAAT TRANSMISI J KE K SETELAH PROSES DESPREADING	98
37. GAMBAR 4.17	PROBABILITAS ERROR, JUMLAH USER, EFISIENSI SPEKTRAL DAN CNR YANG DIPERLUKAN	102
38. GAMBAR 4.18	MODEL UNTUK SISTEM BIPOLAR CDMA	104
39. GAMBAR 4.19	PROBABILITY DENSITY FUNCTION UNTUK SATU INTERFERING USER DAN CODE LENGTH $N=127$	110
40. GAMBAR 4.20	PROBABILITY DENSITY FUNCTION UNTUK SATU INTERFERING USER DAN CODE LENGTH $N=255$	111
41. GAMBAR 4.21	PROBABILITY OF ERROR VERSUS THRESHOLD DENGAN CODE LENGTH $N=127$	114
42. GAMBAR 4.22	PROBABILITY OF ERROR VERSUS JUMLAH USER UNTUK $N=63, 127$ DAN 255	115
43. GAMBAR 4.23	FORMAT PPM /CDMA (a) FRAME PPM (b) SLOT PPM	118

44. GAMBAR 4.24	TRANSMITTER LASER (a) BLOK DIAGRAM (b) ENCODER SEKUEN	119
45. GAMBAR 4.25	RECEIVER KANAL	120
46. GAMBAR 4.26	BIT RATE VERSUS JUMLAH KANAL VIDEO UNTUK UKURAN FRAME PPM YANG BERBEDA	122
47. GAMBAR 4.27	BIT ERROR PROBABILITY VERSUS DAYA LASER RATA-RATA (a) $N=8$, $W=4$ (b) $N=50$, $W=4$	127 128

DAFTAR TABEL

TABEL		Hal
1. TABEL 2.1	KARAKTERISTIK SUMBER OPTIK	20
2. TABEL 2.2	KARAKTERISTIK DETEKTOR OPTIK	23
3. TABEL 2.3	PERBANDINGAN MACAM-MACAM TEKNIK MULTIPLEKS UNTUK SISTEM KOMUNIKASI SERAT OPTIK	33
4. TABEL 3.1	BEBERAPA KODE OPTIMAL (F,3,1)	50
5. TABEL 3.2	PRIME SEQUENCES, P=7	53
6. TABEL 3.3	PRIME CODES, P=7	54
7. TABEL 3.4	PERBANDINGAN KODE-KODE OPTICAL CDMA	55
8. TABEL 3.5	LEBAR PULSA INPUT MAKSIMUM DAN MINIMUM	60
9. TABEL 4.1	PERBANDINGAN JENIS-JENIS OPTICAL CDMA	135

BAB I

PENDAHULUAN

I. 1. Latar Belakang

Dewasa ini, sistem komunikasi serat optik telah berkembang begitu pesat. Selaras dengan perkembangan itu, aplikasi sistem tersebut ke dalam jaringan telekomunikasi semakin luas pula, karena sistem ini menawarkan kemampuan penyesuaian yang luwes terhadap kondisi pemasangan dan perawatan konvensional. Di samping itu sistem komunikasi serat optik pun memberikan penampilan dan keandalan sistem yang tinggi yang ditunjang oleh kemajuan teknologi yang memadai.

Keunggulan sistem komunikasi serat optik banyak diberikan oleh kemampuan serat optik itu sendiri sebagai suatu saluran transmisi, yaitu : dapat menyalurkan sinyal-sinyal informasi dengan kapasitas yang sangat besar tanpa mengalami interferensi dari luar, redaman yang sangat rendah pada daerah panjang gelombang optik yang lebar, ukurannya kecil dan juga amat ringan. Keunggulan-keunggulan tersebut tidak dimiliki oleh konduktor logam.

Penampilan dan keandalan sistem komunikasi serat optik yang tinggi, dapat lebih ditingkatkan dengan penggunaan peralatan-peralatan optik dan teknologi baru yang dapat meningkatkan kapasitas penyaluran informasi serta mempertinggi fleksibilitas perencanaan sistem. Seperti pemanfaatan teknik multipleks untuk

pengiriman berbagai informasi secara simultan dalam satu saluran transmisi.

Dalam sistem komunikasi serat optik, salah satu teknik multipleks yang baru dikembangkan adalah metode CDMA (Code Division Multiple Access). Pada CDMA, setiap pemancar mengkodekan informasinya secara unik dan setiap penerima yang dituju memiliki kode komplementer untuk mendapatkan sinyal yang dibutuhkan. Dengan begitu, dapat diperoleh sejumlah pasangan pemancar-penerima yang bisa berkomunikasi melalui serat optik yang sama.

Bila dibandingkan dengan metode multipleks yang lain, CDMA memiliki beberapa keunggulan, antara lain : pengaksesan dapat secara asinkron dan random, kecepatan data tinggi, dan jaminan sekuriti yang lebih baik. Karena itu perlu dikaji lebih mendalam aplikasi teknik multipleks CDMA dalam sistem komunikasi serat optik, sehingga dapat diperoleh gambaran yang lebih jelas tentang keandalannya, dan untuk selanjutnya bisa dijadikan sebagai teknik multipleks alternatif dalam perencanaan berbagai sistem komunikasi serat optik.

I. 2. Permasalahan

Tugas akhir ini membahas tentang aplikasi teknik multipleks CDMA dalam sistem komunikasi serat optik. Selanjutnya, akan dikaji pula keandalan dari teknik-teknik multipleks *optical* CDMA ini dan dibandingkan dengan beberapa teknik multipleks lainnya yang lebih dulu berkembang. Karena itu, perlu dibahas prinsip-prinsip dasar teknik multipleks CDMA, elemen-elemen teknis yang digunakan dalam sistem *optical* CDMA, karakteristik dan penampilan sistem serta

aplikasinya dalam sistem komunikasi serat optik.

I. 3. Batasan Masalah

Pembahasan dalam tugas akhir ini dibatasi pada aspek prinsip operasi dari teknik multipleks *optical* CDMA dan penampilan (performansi) sistemnya saja, bukan pada konfigurasi perangkat keras (hardware) yang dipakai. Hal ini disebabkan karena aplikasi CDMA dalam sistem komunikasi serat optik dewasa ini masih dalam tahap riset dan eksperimental, sehingga publikasi literatur menyangkut konfigurasi *hardware*-nya sulit didapat. Penggolongan beberapa teknik *optical* CDMA didasari pada jenis pengkodean yang dipakai serta pada jenis modulasi yang digunakan.

I. 4. Metodologi

Penyusunan Tugas Akhir ini lebih bersifat studi literatur, yang pembahasannya diperoleh dari kajian dan analisa pelbagai buku teks serta jurnal-jurnal ilmiah yang ada kaitannya dengan teknik multipleks dalam sistem komunikasi serat optik, khususnya teknik *optical* CDMA.

Dengan menggunakan hasil-hasil studi tersebut dicoba untuk membandingkan beberapa teknik multipleks *optical* CDMA yang telah ada dan dibandingkan pula dengan teknik multipleks lainnya yang telah lama dipakai dalam sistem komunikasi serat optik.

1. 5. Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan tugas akhir ini dikelompokkan dalam beberapa bab. Bab I berisi pendahuluan yang menguraikan latar belakang, permasalahan, batasan masalah, metodologi, sistematika pembahasan, tujuan dan relevansi.

Teori penunjang yang berisikan pembahasan tentang teori dasar sistem komunikasi serat optik dan prinsip-prinsip *Code Division Multiple Access* (CDMA) diuraikan dalam bab II.

Bab III mengupas unsur-unsur teknis *optical* CDMA yang dipakai dalam sistem komunikasi serat optik, mulai dari model sistem *optical* CDMA, jenis-jenis kode hingga tipe-tipe *encoder-decoder* yang dipakai.

Selanjutnya, inti pembahasan dari tugas akhir akan disajikan pada bab IV yang mengupas aplikasi teknik multipleks CDMA dalam sistem komunikasi serat optik beserta penampilan sistemnya.

Sebagai penutup, bab V berisikan kesimpulan dan beberapa saran yang diperoleh dari kajian tugas akhir ini.

1. 6. Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk memberi gambaran tentang aplikasi teknik multipleks CDMA dalam sistem komunikasi serat optik dengan berbagai keuntungan dan keterbatasannya.

1. 7. Relevansi

Melalui studi ini diharapkan hasilnya dapat menunjang aplikasi teknik multipleks CDMA sebagai teknik multipleks alternatif dalam perencanaan sistem komunikasi serat optik, khususnya di Indonesia untuk masa-masa mendatang.

BAB II

TEORI PENUNJANG

II. 1. Umum

Pemanfaatan serat optik sebagai media transmisi saat ini telah menempatkannya sebagai salah satu media alternatif dalam perancangan sistem transmisi yang membutuhkan *bandwidth* cukup lebar. Kapasitas serat yang sangat besar itu akan lebih optimal jika dapat dimanfaatkan untuk mentransmisikan berbagai informasi secara simultan.

Transmisi informasi secara simultan dalam satu media dimungkinkan dengan memanfaatkan teknik multipleks. Salah satunya adalah teknik CDMA, yang telah begitu populer dalam sistem komunikasi radio. Namun dalam sistem komunikasi serat optik, teknik CDMA ini masih tergolong baru bila dibandingkan dengan metode multipleks lainnya.

Untuk itu, sebelum beranjak pada aplikasi CDMA dalam sistem komunikasi serat optik, terlebih dahulu perlu dibahas dasar-dasar sistem komunikasi serat optik itu sendiri dan dasar-dasar CDMA.

II. 2. Teori Dasar Sistem Komunikasi Serat Optik

Kabel serat optik sebagai media transmisi fisik, merupakan penghantar yang bentuknya seperti benang memanjang yang di dalamnya terdapat suatu daerah

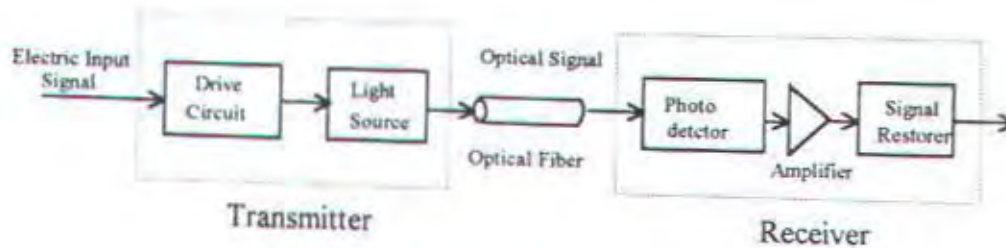
yang berfungsi sebagai pengarah sinar/gelombang elektromagnetik, disebut *core* (inti) dengan indeks bias n_1 . Inti ini dikelilingi oleh suatu bahan dielektrik dari kaca atau plastik dengan indeks bias n_2 , disebut *cladding*, di mana n_2 lebih kecil dari n_1 . Cladding ini berguna untuk mengurangi kerugian karena hamburan yang disebabkan oleh diskontinuitas dielektrik pada permukaan inti, menambah kekuatan mekanik pada serat optik dan juga berguna untuk melindungi inti dari kotoran-kotoran yang terdapat di sekelilingnya.

Jaringan sistem komunikasi yang menggunakan serat optik memiliki beberapa keunggulan, antara lain disebabkan karena beberapa kelebihan yang dimiliki oleh serat optik itu sendiri, di antaranya adalah : serat optik mempunyai kerugian transmisi yang lebih rendah, memiliki pita frekuensi yang lebih lebar, jauh lebih ringan dan lebih kecil dari pada kabel koaksial maupun kawat tembaga biasa. Keunggulan terpenting dari serat optik adalah sifat dielektriknya yang menyebabkan serat optik memiliki sifat kebal terhadap interferensi elektromagnetik maupun gelombang radio yang berasal dari lingkungan luar serat.

Berkas cahaya yang datang dari medium lebih rapat ke medium kurang rapat akan mengalami pemantulan sempurna. Dengan kata lain tidak ada energi cahaya yang dibiaskan masuk ke medium yang kurang rapat. Hal ini merupakan dasar sistem komunikasi melalui serat optik.

II. 2. 1. Diagram Blok

Gambar 2.1 menggambarkan diagram blok dari sistem komunikasi serat

GAMBAR 2. 1¹

ELEMEN-ELEMEN DASAR SISTEM KOMUNIKASI SERAT OPTIK

optik secara umum. Pada bagian pemancar, sumber optik mengubah sinyal listrik menjadi sinyal optik. Setelah sinyal optik disalurkan ke dalam serat, maka sinyal ini akan mengalami redaman dan distorsi, yang meningkat sesuai dengan jaraknya. Hal ini terjadi karena adanya hamburan, penyerapan dan dispersi yang terjadi selama sinyal optik merambat di dalam serat. Pada bagian penerima, sinyal optik yang teredam dan terdistorsi tersebut akan dideteksi oleh detektor cahaya dan mengubahnya kembali menjadi sinyal listrik.

II. 2. 2. Macam-macam Serat Optik

Variasi komposisi bahan core menyebabkan serat optik dapat dibedakan menjadi :

- Step index fiber : serat optik yang mempunyai distribusi indeks bias uniform.

¹ Keiser, Gerd, Optical Fiber Communications, Mc. Grawhill International Editions, Singapore, 1991, hal., 2.

- Graded index fiber : serat optik yang distribusi indeks biasanya merupakan fungsi terhadap jarak radial dari pusat fiber.

Berdasarkan banyaknya mode yang bisa dirambatkan, serat optik dapat dibedakan menjadi :

- Single mode fiber : serat optik yang hanya bisa merambatkan satu mode gelombang saja, yaitu HE₁₁.
- Multi mode fiber : serat optik yang bisa merambatkan beratus-ratus bahkan beribu-ribu mode gelombang.

Secara garis besar ada tiga jenis serat optik, menurut strukur dibedakan atas dasar profil indeks bias dan dimensi cross-sectionalnya. Secara operasi dibedakan atas jumlah mode dan kapasitas informasi yang mampu dibawa. Ketiga jenis tersebut adalah :

1. Single Mode Fiber.
2. Step Index Fiber (Multi Mode).
3. Graded Index Fiber (Multi Mode).

II. 2. 2. 1. Single Mode Fiber

Pada serat optik mode tunggal hanya bisa dirambatkan gelombang elektromagnetik dengan mode HE₁₁, sehingga *bandwidth* yang diberikan cukup lebar, mencapai 50 GHz untuk panjang gelombang tertentu. Lebar bidang optimum akan bisa dicapai bila diperhatikan hal-hal berikut :

- Diameter core harus selalu dikontrol ketepatannya.

- Koefisien ekspansi termal dari bahan core dan cladding harus sesuai ketentuan.
- Indeks bias pembungkus cladding harus diperhitungkan

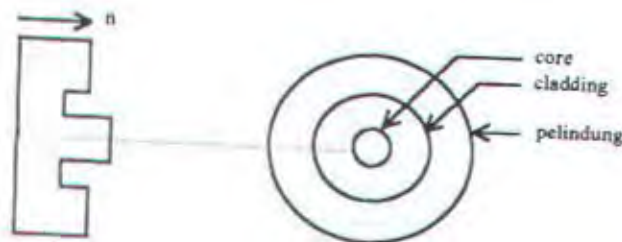
Pada serat optik mode tunggal karena hanya merambatkan satu mode, maka tidak terjadi dispersi intermodal.

Gambar 2.2 menunjukkan struktur serat optik single mode step index. Hubungan antara indeks bias core (n_1) dan indeks bias cladding (n_2) dapat dinyatakan dalam :

$$n_2 = n_1 (1 - \Delta) \quad (2-1)$$

di mana Δ adalah indeks bias relatif antara core dan cladding. Indeks bias relatif dinyatakan dalam :

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2-2)$$



GAMBAR 2.2²
PENAMPANG MELINTANG
DARI SERAT OPTIK SINGLE MODE

² Kao, Charles K., Optical Fiber System : Technology, Design and Application, Mc. Grawhill Book Company, New York, 1982, hal., 3.

Hubungan antara frekuensi kerja dengan jari-jari core (a) dapat dinyatakan dengan :³

$$a = \left(\frac{1.202}{\pi} \right) \left(\frac{\lambda}{n_1 / \sqrt{2NA}} \right) \quad (2-3)$$

Numerical aperture (NA) dari serat optik mode tunggal ini dinyatakan dalam :

$$\begin{aligned} NA &= n \sin \theta_{\max} = n_1 \sin \theta_c \\ &= (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (2-4)$$

di mana n merupakan indeks bias bahan, θ_{\max} adalah sudut datang maksimum yang menghasilkan pemantulan sempurna, θ_c adalah sudut kritis, n_1 adalah indeks bias inti (core), sedangkan n_2 merupakan indeks bias *cladding* serta λ adalah panjang gelombang yang digunakan.

Serat *single mode* ini biasa digunakan untuk komunikasi yang membutuhkan lebar bidang cukup besar dan transmisi jarak jauh. Namun karena diameter *core*-nya yang sangat kecil membuat proses transfer cahaya ke dalam serat, dengan kata lain proses mengumpulkan sinarnya, menjadi sulit.

II. 2. 2. 2. Step Index Fiber

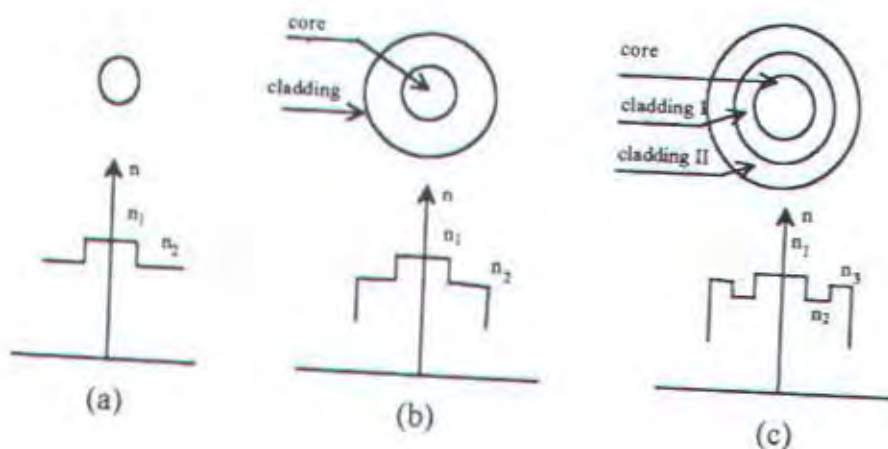
Serat optik jenis ini mempunyai core dengan diameter yang cukup besar, yaitu beberapa kali panjang gelombang cahaya. Ada tiga macam bentuk multimode step index fiber, yaitu :

- ☐ dengan bentuk batang dielektrik
- ☐ dengan core yang dikelilingi satu lapis *cladding*

³ Helmut F. Wolf, Handbook of Fiber Optics, Garland STPH Press, 1979, hal. 52

- dengan core yang dikelilingi dua lapis cladding

Bentuk batang dielektrik merupakan serat optik yang paling sederhana, dengan cladding udara. Bahan pembuatnya yang sesuai adalah bahan gelas atau *fused silica*. Pada gambar 2.3 ditunjukkan penampang step index fiber yang terdiri dari gambar 2.3a penampang serat dengan bentuk batang dielektrik, gambar 2.3b serat dengan satu lapis cladding, dan gambar 2.3c susunan indeks biasnya seperti huruf W. Dengan susunan indeks bias seperti huruf W, akan diperoleh beda indeks bias core cladding yang lebih kecil yaitu $n_1 - n_3$, jadi seolah-olah indeks bias yang di tengah tidak diperhitungkan. Dengan indeks bias yang kecil akan dihasilkan keadaan dispersi yang lebih baik.



GAMBAR 2.3⁴

PENAMPANG STEP INDEX FIBER

⁴ Kao, Charles K. opcit. hal. 34

Harga $n_1 \cong n_2$ sehingga Δ berharga relatif kecil, oleh karenanya $\sin \theta_c$ mendekati harga $(2\Delta)^{1/2}$, sehingga *numerical aperture* dari *step index* fiber dapat dinyatakan dalam :⁵

$$\begin{aligned} NA &= n \sin \theta_{\max} = n_1 \sin \theta_c \\ NA &= (n_1 - n_2)^{1/2} \\ NA &\cong n_1 (2\Delta)^{1/2} \end{aligned} \quad (2-5)$$

Jumlah mode (M) yang masuk ke dalam serat dinyatakan dalam hubungan:⁶

$$M = \frac{2\pi^2 a^2}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2) \quad (2-6)$$

di mana a merupakan jari-jari *core*, n_1 adalah indeks bias *core* dan n_2 adalah indeks bias *cladding*, θ_{\max} adalah sudut datang maksimum yang menghasilkan pemantulan sempurna, θ_c adalah sudut kritis serta λ adalah panjang gelombang yang digunakan.

Serat optik *multimode* jenis *step index* ini banyak dipakai untuk transmisi komunikasi yang lebar bidangnya relatif tidak terlalu besar. Kelebihan utama dari jenis serat ini adalah kemudahannya dalam pengumpulan cahaya, karena *numerical aperture* serta diameter *core*-nya relatif lebih besar. Sehingga dapat digunakan *large area optical source* yang harganya lebih murah serta konektor-konektor yang dibutuhkan juga tak perlu yang terlalu presisi.

II. 2. 2. 3. Graded Index Fiber

Graded Index fiber adalah serat optik yang mempunyai distribusi indeks

⁵ Gerd Keiser, op. cit. hal. 25.

⁶ Ibid hal. 37.

bias parabolik. Dengan distribusi parabolik ini diharapkan agar group delay yang hampir sama antara mode-mode yang merambat bisa didapatkan, sehingga dapat mengurangi dispersi intermodal. Dalam serat graded indeks ini, core mempunyai indeks bias yang merupakan suatu fungsi radial dan dinyatakan dalam : ⁷

$$n(0 \leq r \leq a) = n_1 [1 - 2\Delta(r/a)^\alpha]^{1/2} \quad (2-7a)$$

$$n(r \geq a) = n_1 (1 - 2\Delta)^{1/2} \approx n_1 (1 - \Delta) = n_2 \quad (2-7b)$$

di mana r adalah jarak radial dari sumbu serat, a adalah jari-jari core, n_1 adalah indeks bias pada sumbu *core*, n_2 adalah indeks bias *cladding*, dan parameter α menunjukkan bentuk dari profil indeks bias serat, untuk serat graded indeks dengan distribusi parabolik $\alpha = 2$, sedangkan untuk serat step indeks $\alpha = \infty$.

Indeks bias relatif untuk serat graded indeks dinyatakan dalam :

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2-8)$$

Numerical aperture dari serat graded indeks merupakan fungsi jarak (r) terhadap jari-jari core (a), hubungan ini dinyatakan dalam : ⁸

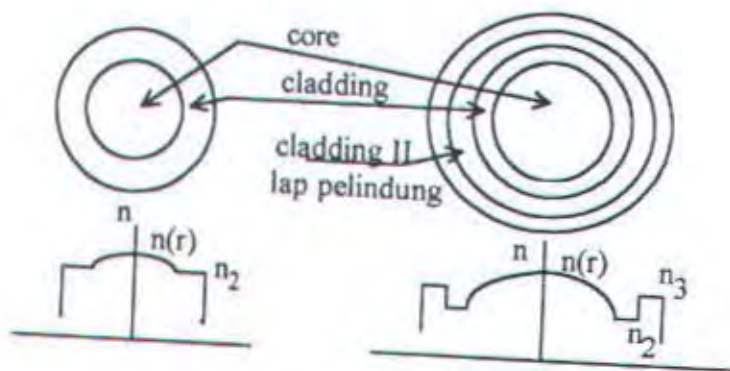
$$\begin{aligned} NA(r \leq a) &= [n^2(r) - n_2^2]^{1/2} \\ &\approx NA(0) [1 - (r/a)^\alpha]^{1/2} \\ NA(r > a) &= 0 \end{aligned} \quad (2-9)$$

Sedangkan numerical aperture pada pusat core dinyatakan dalam :

$$\begin{aligned} NA(0) &= [n^2(0) - n_2^2]^{1/2} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \\ &\approx n_1 (2\Delta)^{1/2} \end{aligned} \quad (2-10)$$

di mana r adalah jarak radial dari sumbu serat, a adalah jari-jari core, n_1 adalah

⁷ Ibid hal. 39.
⁸ Loc. cit

GAMBAR 2.4⁹

PROFIL SERAT GRADED INDEKS

indeks bias pada sumbu *core*, n_2 adalah indeks bias *cladding*. Gambar 2.4 menunjukkan distribusi indeks bias dari serat graded indeks. Jumlah mode (M) yang bisa merambat dalam serat graded indeks dinyatakan dalam hubungan : ¹⁰

$$M = \frac{\alpha}{\alpha+2} a^2 k^2 n_1^2 \Delta \quad (2-11)$$

di mana k adalah konstanta propagasi yang berharga $2\pi / \lambda$, a adalah jari-jari *core*, n_1 adalah indeks bias pada sumbu *core*, dan parameter α menunjukkan bentuk dari profil indeks bias serat, sedangkan Δ merupakan indeks bias relatif.

Serat optik jenis *graded index* ini lebih mudah dalam pengumpulan sinarnya bila dibandingkan dengan serat *single mode*. Meskipun lebar bidangnya jauh lebih kecil daripada lebar bidang serat *single mode*, serat *graded index* memiliki lebar bidang yang lebih besar dari serat jenis *step index multi mode*. Biasanya, *graded index fiber* dipakai untuk transmisi yang jaraknya dekat dan tidak membutuhkan lebar bidang yang terlalu besar.

⁹ Charles K. Kao, op. cit. hal. 36.
¹⁰ Gerd Keiser, op. cit. hal. 43.

II. 2. 3. Sumber Optik

Sumber optik mempunyai peranan penting dalam sistem komunikasi serat optik, karena peralatan ini berfungsi sebagai *transducer* pada bagian pengirim yang akan mengubah sinyal listrik menjadi sinyal optik. Oleh karena itu sumber optik harus memenuhi beberapa persyaratan antara lain :

- Cahaya yang dihasilkan harus sedekat mungkin bersifat monokromatis (berfrekuensi tunggal). Kebanyakan sumber optik tidak berfrekuensi tunggal, akan tetapi memancarkan cahaya dengan beberapa frekuensi pada sebuah jalur atau bagian dari spektrum, yang mungkin cukup lebar. Karena itu harus dipilih sumber optik yang memiliki spektrum cukup sempit.
- Mengeluarkan cahaya yang berintensitas tinggi, sehingga dapat memancarkan daya optik sebanyak mungkin ke dalam serat. Hal ini untuk mengatasi rugi-rugi transmisi sepanjang serat optik.
- Dapat dimodulasi dengan mudah baik secara analog maupun digital.
- Mempunyai panjang gelombang pada daerah dengan kerugian akibat redaman yang kecil.
- Mempunyai masa pakai yang panjang, berukuran kecil, ringkas dan mudah digandengkan pada serat sehingga tidak terjadi rugi-rugi kopling yang berhubungan.

Dua peralatan semikonduktor yang digunakan sebagai sumber optik adalah LED (Light Emitting Diode) dan LD (Laser Diode) yang dikenal dengan laser.

LED dapat dimodulasikan pada kecepatan-kecepatan yang tinggi, walaupun daya optiknya berkurang pada *bit rate* yang meningkat.

Panjang gelombang cahaya yang dihasilkan oleh LED ditentukan dari *band-gap energy* E_g , yaitu :

$$E_g = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2-12)$$

di mana :

h : konstanta Plank ($6,6254 \cdot 10^{-34}$ Joule-det)

ν : frekuensi sinyal optik

λ : panjang gelombang puncak sinyal optik

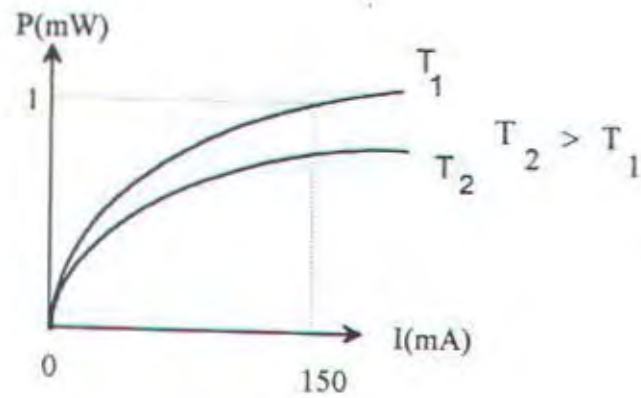
c : kecepatan cahaya

Persamaan di atas dapat dinyatakan dalam :

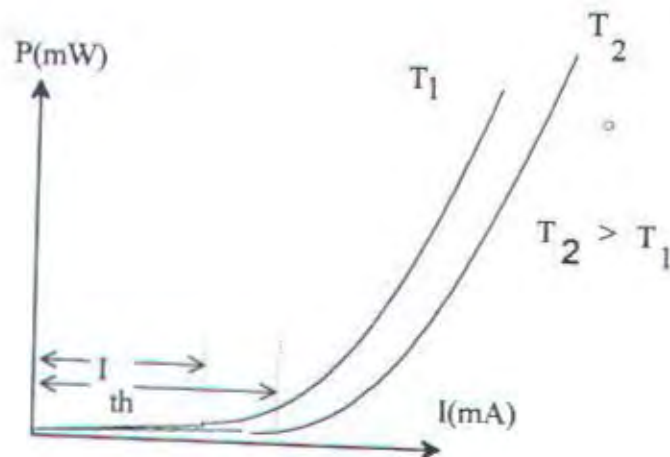
$$\lambda(\mu m) = \frac{1,240}{E_g(eV)} \quad (2-13)$$

Gambar 2.5 menunjukkan hubungan antara daya optik dan arus dari sebuah LED. Pada daerah-daerah tertentu, LED umumnya menunjukkan karakteristik intensitas yang hampir linear terhadap arus. Untuk menghindari cacat sinyal yang keluar dari LED, maka sistem harus dijaga untuk bekerja pada daerah yang linear.

Semikonduktor laser adalah suatu laser padat yang bersifat khusus di mana cara kerja laser ini terjadi pada sambungan semikonduktor dioda dari jenis yang sama dengan yang digunakan pada LED, tapi sudah mengalami perkembangan yang lebih lanjut dengan adanya rangkaian umpan balik. Cahaya yang dihasilkan mendekati koheren. Karenanya lebar spektrum yang dihasilkan adalah sempit, sehingga dapat menghasilkan cahaya dengan mode tunggal dan mempunyai efisiensi *launching* yang besar. Gambar 2.6 menunjukkan daya optik dari sebuah

GAMBAR 2.5¹¹

DAYA OPTIK LED SEBAGAI FUNGSI ARUS

GAMBAR 2.6¹²

DAYA OPTIK LASER SEBAGAI FUNGSI ARUS

¹¹ H. Erkenlenkamp, Ir., "Aspek-aspek transmisi dari Sistem Komunikasi Digital", hal. 135.

¹² Ibid, hal. 136.

laser sebagai fungsi arus. Laser mulai bekerja setelah arus yang masuk melewati arus ambang (threshold current).

Sebagai perbandingan sumber optik yang digunakan di dalam sistem komunikasi serat optik, baik jenis LED maupun dioda laser (tipe semikonduktor dan non semikonduktor laser), pada tabel 2.1 diberikan perbandingan karakteristik umum sumber optik.

Dari tabel tersebut terlihat bahwa cahaya yang dihasilkan LED bersifat inkoheren. Karena itu lebar spektrumnya juga lebih lebar bila dibandingkan dengan sumber optik laser. Lebar spektrum ini sangat mempengaruhi munculnya dispersi pulsa. Dengan demikian, LED lebih rentan akan terjadinya dispersi pulsa bila dibandingkan dengan laser. Selain itu daya yang dihasilkan laser juga jauh lebih besar dibandingkan dengan LED, sehingga LED tidak sesuai untuk dipakai sebagai sumber optik pada *long transmission*. Sumber optik laser juga terlihat lebih baik daripada LED bila dilihat dari kemudahan untuk digandengkan (dikopel) pada serat serta tingkat distorsi harmonisnya.

Namun, dari segi linearitas LED jauh lebih baik daripada sumber optik laser. Hal ini berarti daya LED sangat dipengaruhi oleh fungsi arus, karakteristiknya hampir linear terhadap arus. Berlainan dengan laser, karakteristiknya tidak selinear yang diberikan LED. Meskipun tidak sebaik LED, semikonduktor laser memberikan efek linearitas yang lebih baik bila dibandingkan dengan laser non semikonduktor.

TABEL 2. 1

KARAKTERISTIK SUMBER OPTIK

KARAKTERISTIK	LED	Semikonduktor LASER	Non Semikonduktor LASER
Bahan	GaAs, GaAsAl	GaAsAl, GaAsIn	Nd-YAG
Tipe Cahaya	Inkoheren	Semikoheren	Koheren
Panjang Gelombang (μm)	0,7 - 1,0	0,8 - 1,2	1,0 - 3,0
Lebar Spektrum (nm)	20 - 60	1,5 - 3,0	< 0,5
Radiasi pada 100 mA (w/sr cm^2)	0,1 - 100	1 - 1000	0,01 - 10
Luas Pancaran (nm^2)	0,01 - 10	0,0001 - 0,001	0,1 - 1,0
Lebar Bidang (MHz)	10 - 150	200 - 1000	500 - 2000
Umur (jam)	10000	100000	10000
Linearitas	tinggi	sedang	rendah
Distorsi Harmonis	tinggi	sedang	rendah
Kesesuaian untuk jenis single mode fiber	tidak	ya	ya

II. 2. 4. Detektor Optik

Detektor optik mempunyai peranan penting dalam sistem komunikasi serat optik, karena peralatan ini berfungsi sebagai *transducer* pada bagian penerima yang

akan mengubah sinyal optik menjadi sinyal listrik.

Detektor optik yang dalam sistem komunikasi serat optik harus memiliki persyaratan sebagai berikut :

- Mempunyai efisiensi kuantum yang tinggi, sehingga semua foton yang diserap dapat diubah menjadi elektron bebas. Dengan demikian semua sinyal optik yang masuk diubah menjadi sinyal listrik.
- Mempunyai lebar bidang yang besar, sehingga didapatkan respons frekuensi yang baik. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi distorsi redaman.
- Mempunyai respons spektrum yang baik, sehingga meningkatkan kemampuan *transducer* untuk menyerap foton secara bergantian pada range frekuensi yang lebar.
- Mempunyai keandalan yang tinggi dan karakteristik yang tidak terpengaruh oleh keadaan luar.

Ada dua macam detektor optik yang umum digunakan, yaitu PIN (Positive Intrinsic Negative) dan APD (Avalanche Photo Diode). APD biasanya digunakan untuk sistem yang menggunakan sensitivitas yang tinggi. Sedangkan PIN mempunyai sensitivitas yang tidak begitu tinggi dan sering digunakan dalam komunikasi data.

Besarnya arus yang dihasilkan oleh PIN dapat dinyatakan dalam :

$$I = \frac{\eta q}{h\nu}$$

(2-14)

di mana :

$h\nu$ = energi foton

q = muatan elektron ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

p = daya optik yang sampai pada detektor

η = efisiensi kuantum detektor

Besarnya efisiensi kuantum dari PIN adalah :

$$\eta = 124 (S/\lambda) \% \quad (2-15)$$

di mana S adalah sensitivitas ($\mu A/\mu W$) dan λ adalah panjang gelombang (μm).

Detektor APD hampir sama dengan detektor jenis PIN, hanya mempunyai daerah medan listrik yang lebih besar sehingga dapat menghasilkan arus output yang lebih besar dari pada PIN. Besarnya arus yang ditimbulkan detektor APD dinyatakan dalam :

$$I = \langle M \rangle (\eta q/h\nu) P \quad (2-16)$$

di mana $\langle M \rangle$ adalah besarnya penguatan pada APD yang tergantung pada desain peralatan dan tegangan bias.

Detektor APD menggunakan tegangan catu yang lebih tinggi. Tegangan yang tinggi ini digunakan untuk menimbulkan medan *junction* yang lebih tinggi. Sedangkan pada PIN tegangan catu yang dibutuhkan adalah relatif rendah. Kejelekan APD adalah *avalanche gain* dari APD merupakan fungsi tegangan dan temperatur, sehingga temperatur harus dijaga konstan agar didapat gain yang konstan.

Hubungan antara lebar *band* (B) dengan *rise time*, dapat dinyatakan dalam hubungan :

$$B = \frac{2,4}{2\pi t_r}$$

(2-17)

B dinyatakan dalam Hz dan t_r adalah *rise time*.

Penampilan *photodiode* dapat dipengaruhi oleh keadaan noise, lebar bidang, sensitivitas dan arus gelap (*dark current*). Pada umumnya detektor optik mempunyai karakteristik yang baik pada panjang gelombang sekitar $0,85 \mu\text{m}$, dan penampilan tersebut akan menurun pada panjang gelombang yang lebih besar.

Karakteristik dari beberapa jenis detektor optik diberikan pada tabel 2.2. Dari tabel tersebut terlihat bahwa jenis detektor APD memiliki *noise* yang lebih kecil bila dibandingkan dengan detektor jenis PIN-FET.

TABEL 2. 2
KARAKTERISTIK DETEKTOR OPTIK

KARAKTERISTIK	DETEKTOR OPTIK PIN - FET		JENIS DETEKTOR APD	
BAHAN	Si	InGaAS	Si	G
Panjang Gelombang (μm)	0,35	1,3	0,85	1,3
Tegangan Bias (V)	10 - 150		200 - 350	
Noise, N ($10^{-16} \text{ W/Hz}^{1/2}$)	10 - 20		2 - 10	
Bandwidth (MHz)	50 - 200		200 - 1000	
Sensitivitas BER = $10\text{E-}9$ (dB)	-45	-44	-51	-41

Sedangkan tingkat sensitivitasnya, jenis detektor APD dari bahan Si memiliki sensitivitas paling tinggi. Namun demikian untuk $BER = 10^{-9}$, sensitivitas detektor jenis lain meskipun lebih rendah dari Si, telah cukup memadai.

II. 2. 5. Teknik Modulasi Pada Sistem Komunikasi Serat Optik

Teknik pemodulasian pada sistem komunikasi serat optik dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu :

☐ Modulasi internal.

Modulasi internal atau modulasi secara langsung dilakukan dengan jalan mengubah arus yang diinjeksikan ke sumber optik, sehingga intensitas cahaya yang keluar dari sumber optik sudah termodulasi. Jadi dalam hal ini sumber optik berlaku sebagai modulator. Proses modulasi internal pada sumber optik ini adalah dengan mengoperasikan optik pada daerah linearnya, sehingga power output optik sebanding dengan level sinyal pemodulasi.

☐ Modulasi eksternal

Modulasi eksternal dilakukan dengan cara memanfaatkan peralatan modulator yang dipasang di luar sumber optik. Proses modulasi ini dilakukan pada berkas cahaya yang telah keluar dari sumber optik.

II. 2. 6. Teknik Multipleks pada Sistem Komunikasi Serat Optik

Untuk memanfaatkan lebar bidang dari serat optik secara optimum, maka

kanal sinyal informasi bisa dimultipleks atau digandakan. *Multiplexing* yang telah umum dipakai dalam sistem komunikasi serat optik adalah :

- a). TIME DIVISION MULTIPLEXING-PULSE CODE MODULATION (TDM-PCM)
- b). FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (FDM)
- c). SPACE DIVISION MULTIPLEXING (SDM)
- d). WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING (WDM)
- e). OPTICAL CODE DIVISION MULTIPLE ACCESS (O-CDMA)

II. 2. 6. 1. Sistem TDM - PCM

Teknik multipleks *time division multiplexing* (TDM) mencacah pulsa pada suatu waktu tertentu dari berbagai sinyal yang terpisah lalu menggabungkan pulsa tercacah tersebut dalam satu *bit stream*.

Dalam sistem digital, sistem PCM dapat digabungkan dengan sistem TDM, dan sistem gabungan ini sering disebut sistem PCM ganda atau PCM saja. Dalam sistem TDM, beberapa sinyal informasi analog akan diproses dengan jalan membagi *time frame* ke dalam slot-slot, satu slot untuk tiap sampel sinyal. N kanal yang masing-masing disaring dalam lebar band f_x , secara berurutan disampel dengan saklar putar yang disebut komutator. Saklar ini melakukan $f_s = 1/T_s$ putaran per detik dan setiap satu putaran mengambil masing-masing satu sample dari sinyal input. Sample yang berdekatan akan terpisahkan dengan waktu T_s/N detik. Satu kelompok yang terdiri dari N sample dari N sinyal input yang didapat dari

putaran satu periode dinamakan satu frame.

Dalam sistem ini diperlukan dua macam sinkronisasi, yaitu sinkronisasi sample dan sinkronisasi frame. Bila digabungkan dengan sistem PCM, harga sample tadi dikuantisasikan dan dikodekan dalam kode PCM. Dengan cara TDM - PCM ini, dalam satu saluran secara bersamaan bisa dikirim N kanal informasi. Sebagai contoh adalah pergandaan 24 kanal telepon yang dikenal dengan kanal T1. Dua puluh empat kanal tersebut disample dengan kecepatan 8000 sampling/detik, dan tiap sample dikonversikan dalam kode PCM 7 bit ditambahkan 1 bit untuk sinkronisasi sample dan setiap akhir frame ditambahkan 1 bit untuk sinkronisasi frame.

Jadi dalam satu frame akan terdiri dari : $(24 \times (7+1) + 1) \text{ bit} = 193 \text{ bit}$. Sehingga kecepatan bit total untuk sistem ini adalah : $193 \times 8000 \text{ bit} = 1,544 \text{ Mbit/detik}$. Pergandaan 1,544 Mbit atau 24 kanal telepon ini adalah tingkat (hirarki) paling rendah dan masih dapat dinaikkan beberapa tingkat lagi.

Tahap multipleks di atas masih berlangsung secara elektronis, sehingga untuk dapat dilewatkan ke dalam serat sinyal hasil multipleks tersebut harus diolah secara optis dulu.

II. 2. 6. 2. Sistem Frequency Division Multiplexing (FDM)

Pada sistem FDM setiap kanal informasi diwakili oleh range frekuensi yang berbeda. Sinyal-sinyal dengan kanal yang memiliki lebar pita masing-masing, mulai dari $(BW)_1$ hingga $(BW)_N$, dinaikkan frekuensinya dalam mixer/modulator dengan

frekuensi pembawa f_1 sampai f_N untuk penyediaan kanal transmisi individual $(BW)_{c1}$ hingga $(BW)_{cN}$. Modulator juga memisahkan hasil perkalian modulasi dan *sideband-sideband* yang tak diinginkan. Dalam hal ini $(BW)_{cN}$ lebih besar dari $(BW)_c$ sebagai fungsi dari parameter modulasi.

Kanal-kanal transmisi individual selanjutnya akan digabung dan ditransmisikan melalui serat optik. Pada penerima, sinyal-sinyal akan dikuatkan lagi dan dipisah, lalu dilewatkan *bandpass filter*, sesuai dengan lebar kanal sinyal yang ditransmisikan, $(BW)_{c1}$ hingga $(BW)_{cN}$. Sinyal-sinyal tersebut kemudian dikembalikan ke frekuensi asalnya.

Beberapa hal yang perlu diperhitungkan pada sistem FDM dalam analisa transmisi adalah sebagai berikut :

- Lebar pita yang dibutuhkan merupakan fungsi dari jumlah kanal transmisi, N . Untuk mengurangi *crosstalk* diperlukan lebar pita setiap kanal, $(BW)_{c1}$ hingga $(BW)_{cN}$ dan *guard band* $(BW)_g$ antarkanal.
- Lebar pita penerima mestinya lebih lebar dari lebar pita transmisi sehingga karakteristik filter pada penerima tidak mempengaruhi kanal-kanal yang berada di sisi pita.
- Daya optik, P_1 , dibagi dengan sejumlah N kanal. Sehingga setiap kanal membutuhkan perbedaan daya P_1/N untuk kompensasi antara kanal yang satu dengan yang lainnya.
- Interferensi harmonisa dan intermodulasi antarkanal menambah

jumlah komponen *noise* yang harus diperhitungkan.

II. 2. 6. 3. Sistem Space Division Multiplexing (SDM)

Sistem SDM adalah sistem multipleks yang menggunakan saluran-saluran transmisi yang berbeda untuk kanal-kanal yang berbeda. Jadi tiap kanal disalurkan melalui satu serat optik, sumber optik dan detektor optik sendiri-sendiri. Untuk itu maka beberapa serat optik diikat dalam satu bundel dan bundel-bundel tersebut dapat disatukan lagi menjadi kabel optik. Dalam satu kabel seperti ini bisa memuat beberapa ratus kanal audio dan video, sesuai dengan jumlah serat optik yang dimilikinya.

II. 2. 6. 4. Sistem Wavelength Division Multiplexing (WDM)

Untuk meningkatkan kapasitas penyaluran, bila dikehendaki probabilitas kesalahan yang tetap dan daya yang tetap, maka bisa ditempuh dengan menggunakan beberapa panjang gelombang atau *carrier* optik yang berlainan dalam satu serat optik. Karena laser mempunyai *pulsed linewidth* antara 1 - 2 nm, sedangkan serat optik mempunyai diameter dalam orde mikrometer, maka melalui satu serat optik dimungkinkan mengirimkan beberapa *carrier* yang masing-masing mempunyai panjang gelombang yang berbeda. Masing-masing *carrier* bisa membawa kanal informasi yang tidak saling tergantung satu sama lain. Di samping itu melalui satu serat optik masih dimungkinkan dilakukan penyaluran dua arah. Tentunya dalam hal ini untuk tiap panjang gelombang tertentu membutuhkan jenis

laser dan detektor yang berlainan.

Faktor-faktor teknis yang menentukan jumlah *carrier* yang dapat dipergunakan dalam satu serat optik adalah :

- Panjang gelombang yang digunakan harus terletak pada spektrum yang menunjukkan rugi rendah.
- Bentuk dan lebar garis spektrum dari sumber yang digunakan harus memungkinkan dilakukan pergandaan panjang gelombang.
- Adanya derajat *insertion loss* dan *cross talk* yang dapat diterima dalam sistem tersebut.
- Komponen yang dipergunakan harus memenuhi kriteria yang dikehendaki.
- Bagaimana kemampuan dari multiplexer serta filter pemecahnya.
- Serat optik yang digunakan single mode atau multi mode.

Kesukaran sistem ini adalah dalam hal mendapatkan filter-filter yang memadai, terutama pada bagian penerima. Filter yang digunakan bisa berupa *band pass filter* atau *Dichroic filter*. *Dichroic filter* merupakan lempeng dielektrik yang mempunyai kemampuan untuk meneruskan semua frekuensi di atas frekuensi cut offnya.

II. 2. 6. 5. Optical Code Division Multiple Access (O-CDMA)

Pada *optical CDMA*, terdapat sejumlah N pasangan pemancar-penerima yang dapat berkomunikasi dalam waktu yang bersamaan dan melalui satu kanal

serat optik yang sama. Yang membedakan informasi dari setiap pemancar adalah kode yang digunakan masing-masing pemancar. Setiap pemancar mengkodekan informasinya secara unik dan setiap penerima yang dituju memiliki kode komplementer untuk mendapatkan sinyal yang dibutuhkan. Jadi, setiap adanya pengiriman informasi, semua penerima pasti mendapatkan sinyal dari informasi tersebut. Hanya saja, penerima yang memiliki kode yang sama dengan pemancar itulah yang dapat merekonstruksi sinyal tersebut menjadi informasi. Sedangkan penerima yang tidak memiliki kode yang sama dengan pemancar akan menganggap sinyal tadi sebagai *noise* saja.

II. 2. 7. Perbandingan Teknik Multipleks Optical CDMA dengan Teknik Multipleks lainnya

Untuk menentukan sistem mana yang dipergunakan, maka perlu diketahui pula masing-masing keuntungan dan kerugian sistem tersebut. Kemudian perlu diketahui pula sistem tersebut dipergunakan untuk menyalurkan informasi apa.

Sistem TDM adalah sistem yang memerlukan sumber optik, detektor optik dan serat optik yang sedikit karena sistem TDM hanya memerlukan saluran tunggal dengan carrier tunggal. TDM hampir selalu dipakai dibandingkan dengan FDM bila kanal informasinya digital, jarak transmisi yang cukup jauh (memerlukan banyak *repeater*), dan lebar pita serat optik atau penerima yang terbatas. Sistem TDM mengkonversikan aliran bit paralel menjadi aliran bit yang seri pada peralatan transmitternya dan merubah aliran seri menjadi paralel kembali pada peralatan

receivernya. Sedangkan kerumitan peralatannya sudah tidak menjadi masalah lagi. Kerugian sistem ini adalah kurangnya faktor redundansi dan beberapa komponen ikut menentukan kritis tidaknya sistem, sehingga bila salah satu komponen mengalami kerusakan, maka sistem akan gagal total.

Sistem FDM memerlukan lebih banyak sumber optik dan detektor optik. FDM biasanya lebih banyak dipakai daripada sistem TDM bila terdapat beberapa kondisi sebagai berikut : kanal informasi merupakan kanal analog dan *carrier modulated* (FM, PM, VSB AM), informasinya merupakan informasi *wideband analog* (video) dan pengkodeannya tak menggunakan PCM, jarak transmisinya terbatas sehingga tak membutuhkan *repeater*.

Sistem SDM adalah sistem yang paling sederhana, seperti sistem kanal tunggal yang jumlahnya banyak. Dengan cara ini tidak diperlukan filter-filter yang mahal serta peralatan switching yang rumit. Kerugiannya adalah diperlukan sumber optik, detektor optik dan serat optik yang jumlahnya banyak sehingga harganya menjadi mahal.

Sistem WDM tidak memerlukan konversi paralel-seri dan seri-paralel, karena dalam serat optik sudah digunakan *carrier-carrier* yang paralel. Kerugiannya adalah diperlukannya sumber dan detektor optik yang berlainan yang jumlahnya tergantung pada *carrier* yang dipergunakan. Kemampuan atau jumlah *carrier* maksimum yang dapat dipergunakan tergantung pada range panjang gelombang di mana serat optik memberikan redaman yang rendah serta selisih panjang gelombang yang berdekatan yang diijinkan agar tidak terjadi interferensi.

Sementara ini kesukaran terletak pada hal mendapatkan sumber optik yang bisa menghasilkan redaman rendah dan mencari filter optik yang mempunyai kerapatan tinggi. Dan pada sistem WDM jumlah *user* dalam jaringan tak bisa dalam jumlah yang besar.

Beberapa sistem yang telah disebutkan di atas kecuali sistem WDM, merupakan metode multipleks yang lebih bersifat elektronis. Artinya, sinyal-sinyal yang akan dilewatkan melalui serat optik dimultipleks lebih dulu secara elektronis. Kemudian sinyal hasil multipleks tersebut (masih berupa sinyal elektronik) dipetakan menjadi sinyal-sinyal optik dan selanjutnya baru dilewatkan pada kanal serat optik. Sedangkan pada sistem *optical* CDMA dan WDM, sinyal hasil multipleksnya telah berupa sinyal optik yang dapat langsung dilewatkan pada serat. Dengan begitu kecepatan proses sistem *optical* CDMA dan WDM jauh lebih cepat bila dibandingkan dengan sistem multipleks lainnya.

Keuntungan sistem *optical* CDMA yang tidak dimiliki oleh sistem multipleks lainnya adalah kemampuannya menampung banyak *user* dalam satu jaringan serta memberikan pengaksesan secara *asynchronous* dan random, di mana setiap pemancar dapat melakukan transmisi secara simultan kapan saja tanpa harus menunggu *timing* pemancar lainnya. Dengan begitu penampilan sistem *optical* CDMA hanya tergantung pada jumlah *user* yang melakukan transmisi secara simultan saja. Padahal jumlah tersebut jauh lebih sedikit dibandingkan dengan jumlah *user* yang ada dalam jaringan. Sehingga penampilan sistemnya relatif lebih baik bila dibandingkan dengan sistem multipleks lainnya. Dengan akses secara

asynchronous, penambahan *user* baru ke dalam jaringan juga dapat dilakukan dengan mudah. Di samping itu sistem *optical* CDMA juga memberikan jaminan sekuriti yang lebih baik.

Kerugian yang dimiliki sistem ini adalah dibutuhkannya pengolah sinyal dengan *bandwidth* yang lebar pada sisi penerima, karena sifatnya yang menebar sinyal (*spread spectrum*). Selain itu sistem *optical* CDMA ini juga masih dalam tahap eksperimental, sehingga masih sulit untuk mendapatkan perangkat keras atau standarisasi sistemnya. Namun di masa mendatang, bila komponen-komponen optik telah terintegrasi seperti halnya komponen-komponen elektronik maka sistem ini akan menjadi teknik multipleks alternatif yang menjanjikan kecepatan proses yang luar biasa.

Hasil perbandingan berbagai metode multipleks di atas disajikan dalam tabel 2. 3 berikut ini.

TABEL 2. 3

PERBANDINGAN MACAM-MACAM

TEKNIK MULTIPLEKS UNTUK SISTEM KOMUKASI SERAT OPTIK

NO	KARAKTERISTIK	TDM-PCM	FDM	SDM	WDM	O-CDMA
1.	Tipe	elektronis	elektronis	elektronis	optis	optis
2.	Metode akses	sinkronus	sinkronus	sinkronus	sinkronus	asinkronus
3.	Jenis kanal	digital	analog	analog/ digital	analog/ digital	digital
4.	Jarak transmisi	jauh	dekat	jauh/dekat	jauh/dekat	jauh/dekat
5.	Kecepatan proses	cepat	cepat	cepat	cepat	sangat cepat
6.	Jumlah user	sedikit	sedikit	sedikit	besar	besar
7.	Penggunaan Bandwidth serat	kecil	kecil	kecil	besar	besar

II. 3. Teori Dasar CDMA

Proses pengiriman informasi dalam suatu sistem komunikasi, kadang kala membutuhkan kerahasiaan dan keamanan yang sangat tinggi. Kondisi seperti ini biasanya dibutuhkan untuk komunikasi militer atau bentuk komunikasi lain yang sifatnya terbatas. Kerahasiaan dan keamanan informasi tersebut dapat dicapai dengan membuat informasi yang dikirim kebal terhadap interferensi, kebal terhadap *jamming* dan kebal terhadap penyadapan dari pemakai lain yang tidak diinginkan.

Untuk mencapai tujuan tersebut, dalam sistem komunikasi radio telah dikembangkan suatu teknik *multiple access* yang disebut dengan Code Division Multiple Access (CDMA). Dengan teknik CDMA setiap pemakai dapat beroperasi pada slot frekuensi dan slot waktu yang sama. Untuk pemisahan kanalnya, masing-masing pemakai diberi kode-kode khusus. Sehingga jika satu stasiun penerima ingin mengetahui informasi yang dikirim oleh pemancarnya, maka harus diketahui lebih dulu kode khusus yang dihasilkan pemancar tersebut. Bila kodenya tidak sesuai maka sinyal informasi dari pemancar tadi dianggap sebagai sinyal interferensi. Dengan begitulah kerahasiaan dan keamanan informasi dapat dijaga.

Dalam penerapannya, CDMA memanfaatkan teknik *spread spectrum* yang menebar sinyal informasi dalam bidang frekuensi yang lebar., jauh lebih lebar daripada *bandwidth* sinyal informasinya.

II. 3. 1. Code Division Multiple Access (CDMA)

Kapasitas kanal merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam

perencanaan suatu jaringan telekomunikasi. Dengan menggunakan teknik CDMA permasalahan kapasitas kanal dapat diatasi. Kelahiran teknologi CDMA sebenarnya dilatarbelakangi oleh munculnya teknik *spread spectrum* yang banyak dipakai untuk sistem komunikasi militer.

CDMA dikembangkan dengan tujuan mendapatkan kapasitas yang besar dengan pita frekuensi yang terbatas dan tanpa menurunkan kualitas. Pada teknik CDMA informasi yang telah dikodekan menempati satu band frekuensi yang besar (*spread spectrum*). Dalam media transmisi, informasi yang telah dikodekan tersebut menyerupai noise. Pada sisi penerima informasi tersebut dapat ditemukan kembali dengan menggunakan deretan *pseudonoise* yang sama yang digunakan dalam transmisi.

CDMA tidak mempunyai kemampuan sistem respon yang tajam, sebagai contoh jika jumlah pemakai meningkat, perbandingan *signal to noise ratio* (SNR) menurun. Sehingga penampilannya menurun sampai SNR mendekati ambang batas. Tetapi jika jumlah pemakai lebih kecil daripada kemampuan sistem sebenarnya, maka kemampuan anti jamming bertambah besar.

Ada beberapa keunggulan sistem CDMA, di antaranya :

- Tahan terhadap gangguan radio frekuensi (anti jamming). Pada sistem CDMA sinyal carriernya tidak dapat diramalkan karena dikirim secara pseudorandom, sehingga jammer tidak dapat mendeteksi sinyal informasi.
- Kemampuan anti interferensi. Interferensi sinyal terjadi karena sinyal

informasi yang diterima lebih dari satu sinyal, sehingga akan menimbulkan intermodulasi pada keluaran repeater.

- Low probability of Intercept (LPI). LPI terjadi apabila harga *processing gain* yang tinggi dan frekuensi sinyal carrier tidak dapat diramalkan karena seluruhnya dalam bentuk frekuensi domain dan power pentebaran yang tipis.
- Komunikasi yang aman. Sinyal carrier yang ditransmisikan dalam bentuk random sehingga sangat susah untuk disadap dan pada sistem modulasi carriernya memakai sandi rahasia dalam bentuk kode khusus, sehingga keamanan sinyal informasi terjaga.

Ada dua teknik yang biasa digunakan dalam sistem CDMA, yaitu : *Direct Sequence CDMA* dan *Frequency Hopping CDMA*.

II. 3. 2. Direct Sequence CDMA

Sistem direct sequence merupakan suatu proses penebaran sinyal informasi ke dalam band frekuensi yang jauh lebih besar dari band frekuensi informasi, di mana sinyal informasi yang dikirim diproses terlebih dahulu ke dalam bentuk kode tertentu. Pemrosesan dilakukan dengan cara mengkombinasikan sinyal informasi biner dengan sinyal *pseudonoise* yang memiliki *bit rate* yang lebih tinggi dari *bit rate* sinyal informasi biner. Sebagai contoh, bit rate sinyal informasi biner adalah 10 kbps, maka besarnya bandwidth yang dibutuhkan adalah 10 KHz. Jika setiap bit informasi dikodekan dengan 100 chips, maka akan diperoleh chip rate sebesar 1

Mbps dan memerlukan *bandwidth* sebesar 1 MHz.

Perbandingan antara *bandwidth spread spectrum* dengan *bandwidth* sinyal informasi dapat dinyatakan sebagai *processing gain* (PG), di mana secara matematis dapat ditulis :

$$PG = 10 \log B_{ss} - 10 \log B \quad (2-18)$$

di mana B_{ss} = *bandwidth spread spectrum*.

B = *bandwidth* sinyal informasi.

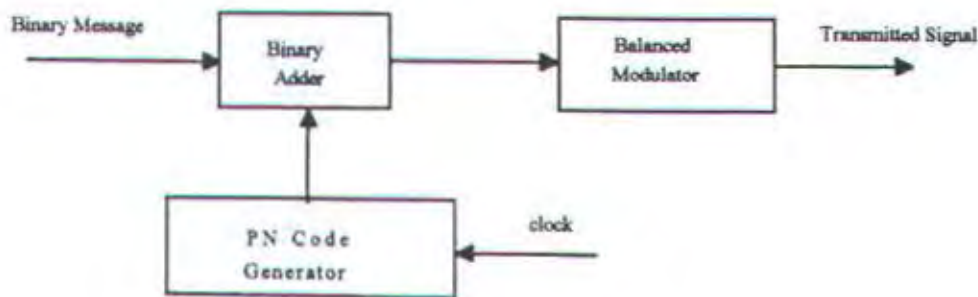
Pada sistem ini unjuk kerja semua unsur sama sehingga kapasitas sistem secara keseluruhan dapat maksimum.

II. 3. 2. 1. Pemancar Direct Sequence

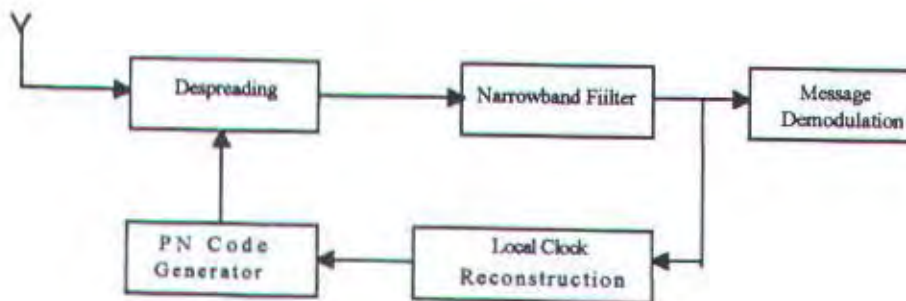
Prinsip dasar pemancar direct sequence dapat dilihat pada gambar 2.7. Dari gambar terlihat bahwa, sinyal informasi biner dijumlahkan secara modulo-2 dengan deretan sinyal pseudonoise periodik yang dibangkitkan oleh *pseudonoise generator*, hasil dari penjumlahan ini kemudian dimodulasi dengan sinyal carrier dengan sistem modulasi digital.

II. 3. 2. 2. Penerima Direct Sequence

Sistem penerima direct sequence harus memiliki kemampuan untuk mendeteksi adanya sinyal, *despreading* dan demodulasi sehingga sinyal informasi yang dikirimkan dapat diperoleh kembali. Blok diagram sistem penerima *direct sequence* diperlihatkan pada gambar 2.8

GAMBAR 2.7¹³

PEMANCAR DIRECT SEQUENCE

GAMBAR 2.8¹⁴

SISTEM PENERIMA DIRECT SEQUENCE

Dari gambar tersebut terlihat, sinyal yang masuk dideteksi terlebih dahulu untuk mengecek keberadaan sinyal ini. Ada dua metode yang digunakan, yaitu :

- Metode aktif.

Pada metode ini dalam pengecekan keberadaan sinyal digunakan

¹³ G. A. Cooper and C. D. Gillem, MODERN SPREAD SPECTRUM, Mc Graw Hill Book. Co, Singapore 1988, hal. 270.

¹⁴ Ibid, hal. 275.

parameter waktu dan frekuensi, sehingga metode ini dipakai bila processing gain (PG) besar.

- Metode pasif.

Metode ini mengecek keberadaan sinyal hanya dengan menggunakan parameter frekuensi, sehingga sinyal dianggap ada setiap saat.

Metode ini digunakan bila PG kecil.

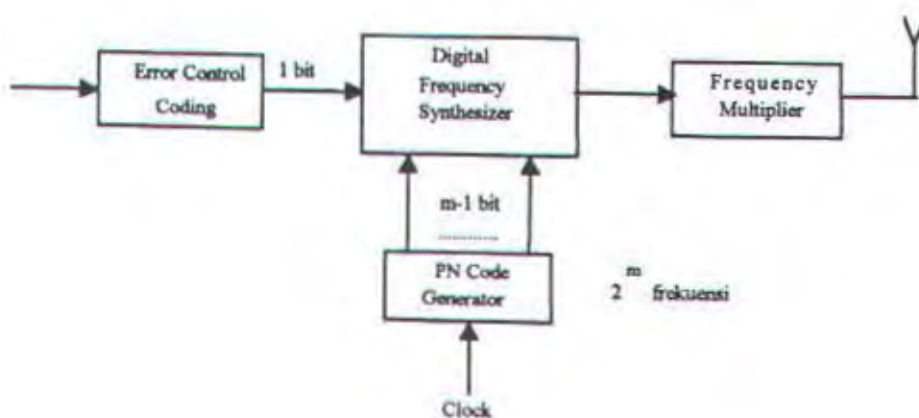
Pada proses *despreading* sinyal yang datang (*spread spectrum*) dikalikan dengan sinyal *pseudonoise* yang diibangkitkan dari *code generator local*. Bila antara sinyal *spread spectrum* dengan sinyal *pseudonoise* sesuai, maka sinyal dilewatkan pada *narrowband filter*, kemudian outputnya didemodulasi. Output dari *narrowband filter* ini digunakan juga untuk sinkronisasi antara sinyal *spread spectrum* dan *pseudonoise*.

II. 3. 3. Frequency Hopping CDMA

Pada sistem *frequency hopping* lebar bidang kanal yang tersedia dibagi-bagi menjadi beberapa slot frekuensi yang berdampingan. Setiap interval pensinyalan, sinyal yang dikirim dapat menempati satu atau lebih slot frekuensi. Pengaturan penempatan ke dalam slot frekuensi diatur secara *pseudonoise* menurut output dari generator *pseudorandom*. Pada umumnya *frequency hopping* menggunakan detektor non koheren, sehingga dapat mengatasi kesulitan dalam menjaga fasa yang sama akibat perubahan frekuensi.

II. 2. 3. 1. Pemancar Frequency Hopping

Sistem pemancar frequency hopping ditunjukkan pada gambar 2.9. Dari gambar terlihat bahwa sinyal informasi yang akan dikirim dikoreksi dahulu dari kesalahan akibat interferensi dengan kanal frekuensi lain, kemudian direkonstruksi sehingga unjuk kerja sistem dapat meningkat. *Digital frequency synthesizer* menerima sinyal m digit biner (bit) yang berasal dari sinyal informasi dan sinyal $m-1$ bit yang berasal dari kode generator. Sinyal m bit dan $m-1$ bit ini mengatur lompatan frekuensi yang diberikan oleh *digital frequency synthesizer*. Jika bit informasi menghasilkan perubahan pergeseran frekuensi terkecil maka akan menghasilkan sinyal FSK.



GAMBAR 2.9¹⁵

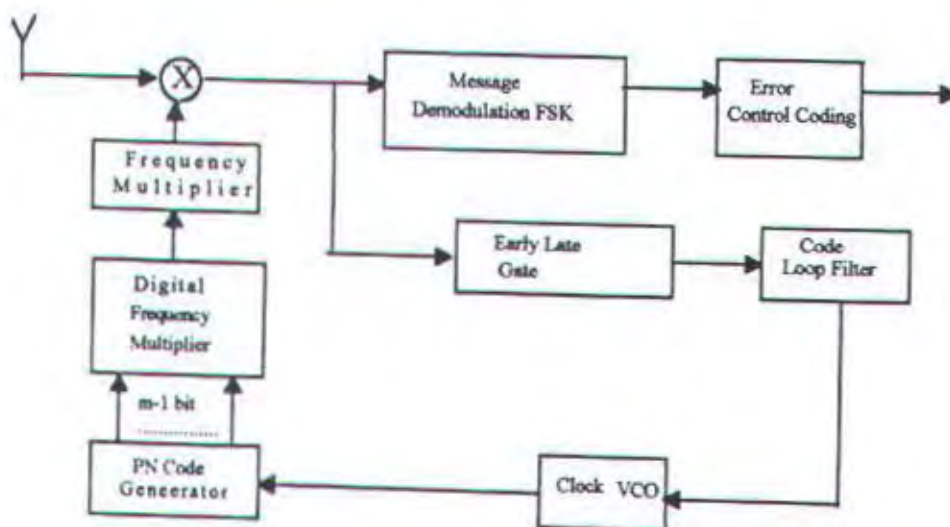
PEMANCAR FREQUENCY HOPPING

¹⁵ Ibid, hal. 227.

Bit $m-1$ dari *pseudonoise code generator* yang berubah secara random akan melompatkan sinyal FSK dari kanal frekuensi satu ke kanal lainnya sesuai dengan jangkauan frekuensi yang mungkin. *Frequency multiplier* berfungsi untuk memperbesar bandwidth sehingga harga processing gain dapat meningkat.

II. 3. 3. 2. Penerima Frequency Hopping

Gambar sistem penerima *frequency hopping* ditunjukkan pada gambar 2.10. Sinyal *frequency hopping* dibangkitkan secara lokal. PN code generator mengedalikan *synthesizer*, kemudian sinyal yang dihasilkan oleh sebuah mixer dengan sinyal frekuensi yang diterima oleh antenna.



GAMBAR 2.10¹⁶

PENERIMA NON KOHEREN FREQUENCY HOPPING

¹⁶ Ibid, hal. 278.

Jika kedua sinyal tersebut frekuensinya berkorelasi (sesuai) maka akan menghasilkan sinyal binary FSK acak, kemudian melalui sebuah demodulator sinyal tersebut didemodulasi sehingga menghasilkan sinyal informasi.

Selain dilewatkan ke demodulator, sinyal tersebut dilewatkan ke *early late gates* untuk mendapatkan sinyal kesalahan dan mengontrol frekuensi clock, juga untuk mensinkronkan sinyal yang datang dengan output frequency multiplier.

Setelah mengetahui hal-hal mendasar menyangkut sistem komunikasi serat optik dan teknik multipleks *code division multiple access*, selanjutnya pada bab III akan dibahas unsur-unsur teknis yang mendukung suatu sistem *optical CDMA*.

BAB III

UNSUR-UNSUR TEKNIS OPTICAL CDMA

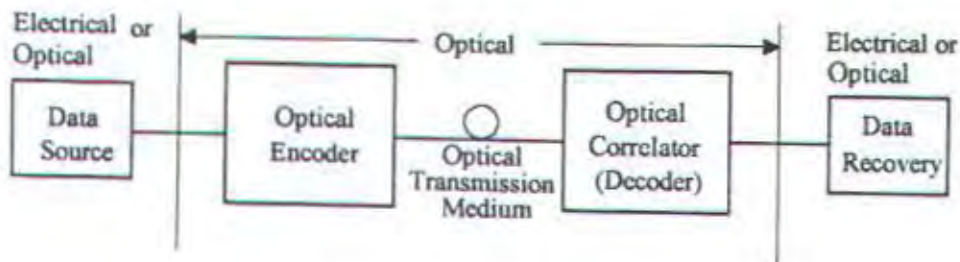
III. 1. Umum

Dalam membangun sebuah sistem teknis multipleks tentu saja terlebih dahulu harus diketahui unsur-unsur teknis yang mendukungnya. Secara umum sistem komunikasi serat optik yang memanfaatkan teknik *optical* CDMA sebagai metode multipleksnya membutuhkan *encoder* dan *decoder* sebagai unsur-unsur teknis utamanya. Di mana *encoder* dan *decoder* itu sendiri tak terlepas dari pemilihan kode-kode yang akan dipakai. *Encoder* dibutuhkan untuk proses konversi bit-bit informasi menjadi deretan optik berkecepatan tinggi sedangkan *decoder* untuk proses sebaliknya.

Karena itu, dalam bab ini akan dibahas unsur-unsur teknis *optical* CDMA yang mencakupi model untuk sistem *optical* CDMA, jenis-jenis kode yang dipakai serta pasangan *encoder-decoder*-nya.

III. 2. Model Sistem Optical CDMA

Sistem CDMA untuk optik secara umum terdiri : *information data source*, diikuti oleh laser bila informasi masih dalam bentuk sinyal elektrik, dan sebuah *optical encoder* yang memetakan setiap bit informasi menjadi deretan optik

GAMBAR 3.1¹⁷

SISTEM KOMUNIKASI SERAT OPTIK DENGAN OPTICAL CDMA ENCODER DAN DECODER

berkecepatan tinggi. Selanjutnya dikopel melewati kanal serat single mode, seperti pada gambar 3.1. Di sisi penerima, deretan pulsa optik akan dibandingkan dengan replikanya (proses korelasi) dan dengan level threshold pada comparator untuk *data recovery*.

Dalam CDMA untuk serat Optik (Optical CDMA/O-CDMA) terdapat sejumlah N pasangan pemancar-penerima (user). Sekumpulan sekuen pulsa optik O-CDMA pada dasarnya menjadi sekumpulan *address code* atau *signature sequences* untuk jaringan. Untuk pengiriman informasi dari *user j* ke *user k*, *address code* untuk penerima k ditumpangkan pada data oleh encoder di simpul $ke-j$.

Sejumlah N pemancar dimungkinkan untuk melakukan transmisi setiap

¹⁷ Jawad A. Salehi, *Code Division Multiple Access Techniques in Optical Fiber Networks-Part I : Fundamental Principles*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 37, No. 8, August, 1989, hal 824.

saat, dan sinkronisasi jaringan tidak dibutuhkan. Di sisi penerima, *correlation-type decoder* dipakai untuk memisahkan sinyal-sinyal yang ditransmisikan.

III. 3. Jenis-jenis Kode Optical CDMA

Salah satu tujuan utama dari OF-CDMA adalah bagaimana mengekstrak data dari sekumpulan deretan pulsa yang memuat informasi dari sejumlah pemakai/user. Untuk memperoleh kemudahan dalam ekstraksi data maka yang memegang peranan penting adalah kode-kode atau sekuen-sekuen yang dipakai untuk memetakan bit-bit informasi. Karena itu tak sembarang kode atau sekuen dapat diaplikasikan dalam CDMA untuk sistem komunikasi serat optik. Kode-kode atau sekuen-sekuen yang dipakai harus memenuhi dua kondisi, sebagai berikut :

1. Setiap deret/sekuen dapat dengan mudah dibedakan dari versi pergeseran deret itu sendiri (shifted sequence).
2. Setiap deret/sekuen dapat dengan mudah dibedakan dari setiap deret yang lain dalam satu set sekuen.

Sedangkan jenis serat optik yang dipakai adalah serat yang memiliki *bandwidth* paling lebar, yaitu single mode fiber.

Penyebab utama sistem CDMA -elektrik maupun optik- dapat memberikan hasil yang memuaskan adalah terletak pada pemilihan deretan-deretan atau sekuen-sekuen berkecepatan tinggi, biasa disebut *signature sequences*, di mana bit-bit data informasi dari pemakai yang berbeda dipetakan. Dalam CDMA, beberapa *user asynchronous* menempati kanal yang sama secara simultan.

Penerima yang dituju harus dapat mengekstrak data yang diwakili *signature sequences* dalam kehadiran *signature sequences* dari *user* yang lain. Sehingga, sangat dibutuhkan *signature sequences* yang dapat dibedakan dari versi pergeseran waktunya dan juga dapat dibedakan dari *signature sequences* yang lainnya.

III. 3. 1. Kode Optik Ortogonal (Optical Orthogonal Code)¹⁸

Kode optik ortogonal (optical orthogonal code/OOC) merupakan golongan sekuen (0,1) dengan sifat *auto correlation* dan *cross correlation* yang baik. Penggunaan OOC memungkinkan *user asynchronous* dalam jumlah besar mentransmisikan informasi secara efisien dan andal. Berkurangnya kebutuhan sinkronisasi dalam jaringan akan meningkatkan fleksibilitas sistem. Kode optik ortogonal ini ditujukan untuk lingkungan yang "unipolar" yang tak memuat komponen negatif.

III. 3. 1. 1. Sifat-sifat Fundamental dari Kode Optik Ortogonal

Secara umum, sebuah kode optik ortogonal $C(F, K, \lambda_s, \lambda_c)$ merupakan keluarga dari sekuen-sekuen (0,1) dengan panjang F dan bobot K serta λ_s dan λ_c sebagai konstanta *auto-* dan *crosscorrelation*. Dalam hal ini K merupakan jumlah bit "1" dalam sekuen itu.

Diasumsikan dua sinyal periodik $x(t)$ dan $y(t)$:

$$x(t) = \frac{1}{T_c} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n P_{T_c}(t - nT_c) \quad (3-1)$$

¹⁸ *ibid*, hal. 824-826

$$y(t) = \frac{1}{T_c} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n P_{T_c}(t - nT_c) \quad (3-2)$$

di mana $P_{T_c}(t)$ merupakan pulsa empat persegi (rectangular pulse) dengan durasi T_c . Untuk $x(t) = x(t+T)$ dan $y(t) = y(t+T)$ untuk semua t , maka sekuen-sekuen (x_n) dan (y_n) adalah sekuen-sekuen periodik dengan perioda $F = T/T_c$. Untuk harga τ , $0 \leq \tau \leq T$ dan $\tau = lT_c$ di mana l integer yang terletak antara $(0, F-1)$, x_n dan y_n harus memenuhi kedua sifat berikut :

a. Sifat auto-korelasi

$$|z_{x,x}(l)| = \left| \sum_{n=0}^{F-1} x_n x_{n+l} \right| = \begin{cases} K & \text{untuk } l=0 \\ \leq \lambda_a & \text{untuk } 1 \leq l \leq F-1 \end{cases} \quad (3-3)$$

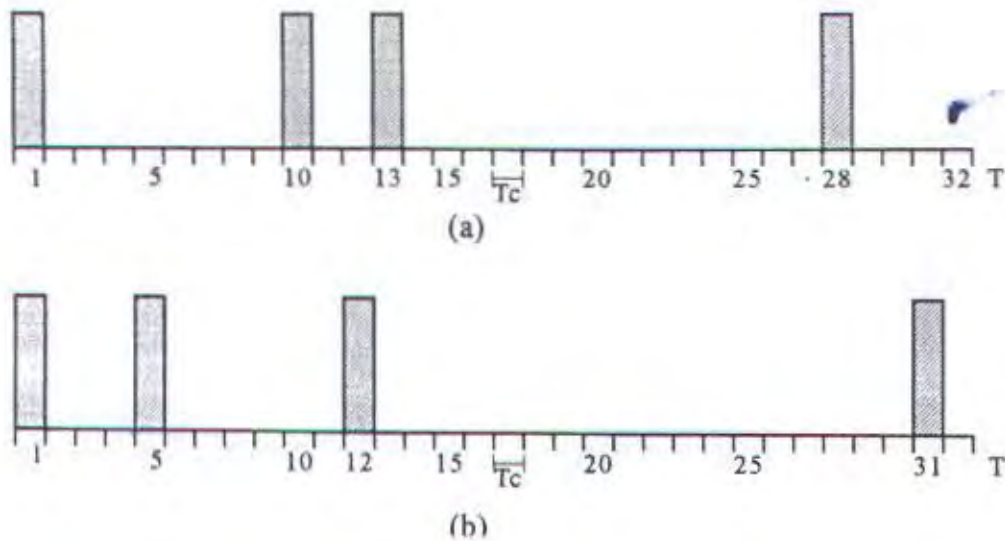
b. Sifat korelasi silang

$$|z_{x,y}(l)| = \left| \sum_{n=0}^{F-1} x_n y_{n+l} \right| \leq \lambda_c \quad \text{untuk } 0 \leq l \leq F-1 \quad (3-4)$$

di mana K , λ_a , λ_c merupakan konstanta. Sedangkan λ_a , λ_c minimum yang mungkin dicapai adalah 1.

Sebagai contoh dari kode optik ortogonal (OOC) dapat dilihat pada gambar 3.3. Dua buah OOC, A dan B, dengan panjang (length) = 32 dan bobot (weight) = 4 serta koefisien autokorelasi dan korelasi silang = 1, atau dapat ditulis $F = 32$ dan $K = 4$ serta $\lambda_a = \lambda_c = 1$. Dalam hal ini T , waktu untuk 1 bit informasi, dibagi menjadi 32 T_c (chip times) yang sama.

OOC A diwakili oleh penempatan *chip waveform* pada posisi chip pertama, kesepuluh, ketigabelas dan keduapuluhdelapan sedangkan OOC B pada posisi pertama, kelima, keduabelas dan ketigapuluhsatu. OOC A dapat ditulis sebagai $C = \{10000000010010000000000000010000\}$, dalam (F, K, λ) dapat ditulis $(32, 4, 1)$, atau dalam teori himpunan $C = \{\{0, 9, 12, 27\}\} \text{modula } 32$. Dan OOC B



GAMBAR 3.3

DUA KODE OPTIK ORTOGONAL DENGAN $F=32$, $K=4$, $\lambda_s = \lambda_c = 1$

ditulis sebagai $C=\{1000100000010000000000000000010\}$, dalam (F,K,λ) dapat ditulis $(32,4,1)$ atau $C=\{0,4,11,30\}$.

Untuk membuktikan OOC A dan OOC B memiliki harga $\lambda_s = \lambda_c = 1$ sebagaimana disyaratkan, dapat diuraikan sebagai berikut. OOC A dan OOC B dapat ditulis dalam notasi himpunan lain :

$$A = \{\tau_{A1}, \tau_{A2}, \tau_{A3}, \tau_{A4}, \tau_{A5}\}$$

$$B = \{\tau_{B1}, \tau_{B2}, \tau_{B3}, \tau_{B4}, \tau_{B5}\}$$

di mana τ_{A1} merupakan delay relatif antara awal pulsa pertama dengan awal pulsa kedua dan $\tau_{A2}, \tau_{A3}, \tau_{A4}, \tau_{A5}$ berturut-turut merupakan delay relatif antara pulsa

kedua dengan pulsa ketiga, pulsa ketiga dengan pulsa keempat dan pulsa keempat dengan pulsa pertama dari sekuen periodik. Begitu juga halnya dengan OOC B.

Perluasan himpunan A, disebut A_{EXT} (extended A), merupakan semua kombinasi linear dari delay relatif yang berkaitan. Sehingga $A_{EXT} = \{\tau_{A1}, \tau_{A2}, \tau_{A3}, \tau_{A4}, \tau_{A1} + \tau_{A2}, \tau_{A2} + \tau_{A3}, \tau_{A3} + \tau_{A4}, \tau_{A4} + \tau_{A1}, \tau_{A1} + \tau_{A2} + \tau_{A3}, \tau_{A2} + \tau_{A3} + \tau_{A4}, \tau_{A3} + \tau_{A4} + \tau_{A1}, \tau_{A4} + \tau_{A1} + \tau_{A2}\}$. Jumlah semua elemen dari A_{EXT} , $[A_{EXT}] = 12$. Begitu juga dengan perluasan himpunan B, disebut B_{EXT} (extended B). Sehingga diperoleh $B_{EXT} = \{\tau_{B1}, \tau_{B2}, \tau_{B3}, \tau_{B4}, \tau_{B1} + \tau_{B2}, \tau_{B2} + \tau_{B3}, \tau_{B3} + \tau_{B4}, \tau_{B4} + \tau_{B1}, \tau_{B1} + \tau_{B2} + \tau_{B3}, \tau_{B2} + \tau_{B3} + \tau_{B4}, \tau_{B3} + \tau_{B4} + \tau_{B1}, \tau_{B4} + \tau_{B1} + \tau_{B2}\}$. Jumlah elemen dari B_{EXT} , $[B_{EXT}] = 12$.

Untuk sekuen A dan sekuen B agar memenuhi sifat autokorelasi periodik dengan $\lambda_s = 1$, maka dalam himpunan A_{EXT} dan B_{EXT} tak boleh terdapat elemen delay yang berulang, artinya tak boleh ada dua atau lebih elemen dari A_{EXT} dan B_{EXT} yang sama.

Selain itu, antara sekuen A dan B juga harus memenuhi sifat korelasi silang yang disyaratkan. Agar dua sekuen A dan B, yang memiliki panjang (F) dan bobot (W) yang sama, memiliki korelasi silang dengan $\lambda_c = 1$ maka interseksi antara A dan B harus menghasilkan himpunan kosong, $A_{EXT} \cap B_{EXT} = \phi$, di mana ϕ merupakan himpunan kosong.

Dari gambar 3.3, didapat $A = \{9, 3, 15, 5\}$ dan $B = \{4, 7, 19, 2\}$, sehingga perluasan himpunan A, $A_{EXT} = \{9, 3, 15, 5, 12, 18, 20, 14, 27, 23, 29, 17\}$ serta perluasan himpunan B, $B_{EXT} = \{4, 7, 19, 2, 11, 26, 21, 6, 30, 28, 25, 13\}$. Dengan begitu terlihat bahwa tidak ada elemen dari A_{EXT} yang berulang dua kali atau lebih, begitu juga

dengan B_{EXT} . Hal ini menunjukkan A dan B memenuhi sifat autokorelasi dengan $\lambda_s=1$. Selanjutnya, juga tak ada elemen yang sama antara A_{EXT} dengan B_{EXT} , dengan kata lain $A_{EXT} \cap B_{EXT} = \emptyset$. Hal ini membuktikan bahwa antara A dan B memenuhi sifat korelasi silang, $\lambda_c=1$.

Untuk aplikasi dalam CDMA pada sistem komunikasi serat optik dibutuhkan OOC yang lebar, artinya memiliki *codeword* sebanyak mungkin. Sebuah kode optik ortogonal, $C=(F, K, \lambda_s, \lambda_c)$ yang memiliki ukuran terbesar disebut kode optik ortogonal optimal, disimbolkan dengan $\phi=(F, K, \lambda_s, \lambda_c)$. Beberapa kode optik ortogonal optimal ditunjukkan dalam tabel 3.1.

TABEL 3.1¹⁹
BEBERAPA KODE OPTIMAL (F,3,1)

F	Optimal (F,3,1) Codes
7	{0,1,3}
13	{0,1,4}, {0,2,7}
19	{0,1,5}, {0,2,8}, {0,3,10}
25	{0,1,6}, {0,2,9}, {0,3,11}, {0,4,13}
31	{0,1,7}, {0,2,11}, {0,3,15}, {0,4,14}, {0,5,13}
37	{0,1,11}, {0,2,9}, {0,3,17}, {0,4,12}, {0,5,18}, {0,6,12}
43	{0,1,19}, {0,2,22}, {0,3,15}, {0,4,13}, {0,5,16}, {0,6,14}, {0,7,17}

¹⁹ Fan R. K. Chung, Jawad A. Salehi, Victor K. Wei, Optical Orthogonal Codes : Design, Analysis, and Applications, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 35, No. 3, May 1989, hal. 602.

Semakin besar ukuran sebuah OOC akan semakin besar pula jumlah *codeword* yang dapat dipakai, sehingga semakin banyak pula jumlah *user* yang dapat ditampung dalam sebuah sistem komunikasi serat optik yang memanfaatkan CDMA sebagai teknik multipleksnya.

III. 3. 2. Kode Gold (Gold Code)²⁰

Syarat sebuah kode agar dapat diaplikasikan dalam CDMA untuk sistem komunikasi serat optik, salah satunya adalah memiliki koefisien korelasi silang sekecil mungkin. Sekuen dengan panjang maksimal (*maximal length sequence* / *M sequence*) merupakan sekuen-sekuen yang dibangkitkan *shift register* dengan panjang $N=2^n + 1$, di mana n adalah integer. Fungsi korelasi silang dari sekuen ini diberikan oleh persamaan :

$$\text{Max}[\theta_{ab}(l)] > -1 + 2^{(n+1)/2} \quad (3-5)$$

di mana θ_{ab} adalah korelasi silang antara a dan b yang merupakan sekuen-sekuen M dengan $N=2^n-1$, serta l merupakan pergeseran fase (*phase shift*). Persamaan di atas menunjukkan bahwa nilai korelasi silang dari sekuen-sekuen M cenderung besar. Artinya, interferensi akan sering terjadi, sehingga sangat membatasi ukuran dari kode itu sendiri.

Sekuen *gold code* diperoleh dengan cara mengkombinasikan pasangan sekuen M dengan penjumlahan modulo 2. Sehingga sekuen *gold code* merupakan

²⁰ Shinichi Tamura, Shigenori Nakano and Kozo Okazaki, *Optical Code-Multiplex Transmission by Gold Sequences*, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. LT-3, No. 1, February 1985, hal. 121.

himpunan $N+2$ sekuen yang didapat dari :

$$G(a,b)=\{a, b, a+b, a+Tb, a+T^2b, \dots, a+T^{N-1}b\} \quad (3-6)$$

di mana a dan b adalah sekuen-sekuen M satu periodik dengan panjang N , T merupakan operator pergeseran fase (phase shift operator), yang menggeser sekuen secara siklik ke kiri sejauh satu chip.

III. 3. 3. Kode Utama (Prime Code)²¹

Kode Gold (Gold Code), secara umum memberikan nilai korelasi silang yang tinggi. Hal ini menjadikan kode gold kurang sesuai dipakai dalam sistem komunikasi serat optik inkoheren. Untuk itu diperlukan jenis kode lain yang nilai korelasi silangnya rendah. Salah satu yang memenuhinya adalah kode utama atau *prime code*.

Kode utama juga merupakan jenis kode *unipolar*, yakni kode yang memuat unsur positif saja, $(0,+1)$. Karena sifatnya yang *unipolar*, seperti halnya kode optik ortogonal, kode utama ini dalam pendeteksiannya juga menggunakan metode *direct detection* atau metode deteksi langsung.

Prime code, memiliki panjang (length) $N=P^2$, diturunkan dari sekuen-sekuen *prime* dengan panjang P yang diperoleh dari *Galois field* $G_F(P)=\{0,1,2,\dots,P-1\}$, di mana P adalah nomor utama (prime number). Mula-mula dibangkitkan dulu sekuen-sekuen *prime* $P \{S_i^P : i = 0 \text{ hingga } P-1\}$, setiap sekuen dengan elemen P didapat dari :

²¹ Andrew S. Holmes and Richard R. A. Syms, *All-Optical CDMA Using "Quasi-Prime" Codes*, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 10, No. 2, February 1992, hal. 280.

$$S_i^P(j) = [i \cdot j]_p, \text{ (untuk } i=0 \text{ hingga } P-1, \text{ dan } j=0 \text{ hingga } P-1) \quad (3-7)$$

di mana $[\]_p$ merupakan pengurangan modulo p .

Dari setiap sekuen S_i^P , kemudian dipetakan menjadi kode biner C_i^P dengan panjang (length) P^2 yang memenuhi persamaan berikut :

$$\begin{aligned} C_i^P(n) &= 1 && \text{untuk } n = jP + S_i^P(j), \text{ di mana } j = 0 \text{ hingga } P-1 \\ &= 0 && \text{untuk } n \text{ yang lain.} \end{aligned} \quad (3-8)$$

Tabel 3.2 dan 3.3 memberikan ilustrasi bagaimana terbentuknya sekuen *prime* dan kode *prime*.

TABEL 3.2
PRIME SEQUENCES, $P=7$

	$j=0$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$	$j=6$
Sequence S_0^+	0	0	0	0	0	0	0
Sequence S_1^+	0	1	2	3	4	5	6
Sequence S_2^+	0	2	4	6	1	3	5
Sequence S_3^+	0	3	6	2	5	1	4
Sequence S_4^+	0	4	1	5	2	6	3
Sequence S_5^+	0	5	3	1	6	4	2
Sequence S_6^+	0	6	5	4	3	2	1

TABEL 3.3
PRIME CODES, $P=7$

	frame 0	frame 1	frame 2	frame 3	frame 4	frame 5	frame 6
Code C_0	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
Code C_1	1000000	0100000	0010000	0001000	0000100	0000010	0000001
Code C_2	1000000	0010000	0000100	0000001	0100000	0001000	0000010
Code C_3	1000000	0001000	0000001	0010000	0000010	0100000	0000100
Code C_4	1000000	0000100	0100000	0000010	0010000	0000001	0001000
Code C_5	1000000	0000010	0001000	0100000	0000001	0000100	0010000
Code C_6	1000000	0000001	0000010	0000100	0001000	0010000	0100000

III. 3. 4. Perbandingan Kode-kode Optical CDMA

Perbandingan antara ketiga kode tersebut dapat dilihat pada tabel 3.4. Dari beberapa kode Optical CDMA yang telah dijelaskan di atas, jenis kode *optical orthogonal code* adalah kode yang paling banyak dipakai. Selain memiliki nilai korelasi silang (*cross correlation*) yang rendah juga realisasi *code generator* relatif lebih mudah karena memiliki beberapa alternatif metode desainnya, seperti dengan : *iterative construction*, *greedy algorithm*, *projective geometry* dan *combinatorial methods*. Kode optik ortogonal juga hanya mengandung komponen positif saja (unipolar), sehingga dapat mengurangi interferensi bila dipakai dalam sistem komunikasi yang *direct detection*.

Kode gold (gold code) sangat jarang dipakai, karena nilai korelasi silangnya

TABEL 3.4

PERBANDINGAN KODE-KODE OTICAL CDMA

NO	KARAKTERISTIK	OOC	GOLD CODE	PRIME CODE
1	Tipe	Unipolar	Bipolar	Unipolar
2	Korelasi silang	Rendah	Tinggi	Rendah
3	Realisasi	Mudah	Mudah	Agak sulit
4	Metode deteksi	Direct detection	Coheren	Direct detection

yang tinggi. Selain itu, kode gold juga bertipe bipolar atau mengandung komponen positif dan negatif sehingga rentan terhadap interferensi.

Sedangkan kode utama hampir sama dengan kode optik ortogonal. Hanya saja realisasi *code generator*-nya relatif lebih sukar karena tak memiliki banyak alternatif dalam metode pembangkitannya.

III. 4. Encoder-Decoder Optical CDMA

Pada sistem komunikasi serat optik yang memanfaatkan CDMA sebagai teknik multipleks, bit-bit informasi sebelum dilewatkan kanal serat optik terlebih dahulu harus dikodekan dulu menjadi sekuen-sekuen optik berkecepatan tinggi. Di sisi penerima sekuen-sekuen tadi, setelah melalui proses korelasi, didekodekan lagi sehingga sama dengan informasi yang dikirim dari pemancar. Dengan begitu, untuk mengkodekan bit-bit informasi menjadi kode-kode berkecepatan tinggi dan mendekodekan kode-kode menjadi bit-bit informasi kembali diperlukan pasangan

encoder-decoder.

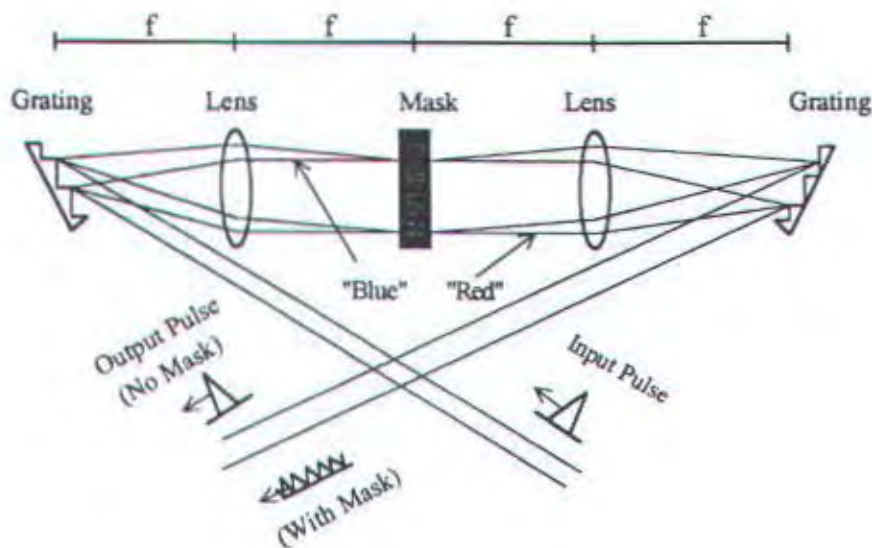
Beberapa pasangan *encoder-decoder* yang telah dipakai dalam *optical* CDMA adalah :

1. Spectral Encoding-Decoding.
2. Fiber Optic Delay Line.
3. Ladder Encoder-decoder.

III. 4. 1. Spectral Encoding-Decoding

Pengkodean dengan metode *spectral encoding* secara praktis diperlihatkan dalam gambar 3.4. Pulsa ultrapendek (ultra-short pulse) yang mewakili 1 bit informasi diarahkan pada *encoder* optik, yang terdiri dari sepasang kisi difraksi (*diffraction gratings*) yang ditempatkan pada pusat magnifikasi, dan sepasang lensa konfokal (*confocal lens pair*). Kisi pertama menguraikan komponen-komponen spektrum menjadi beberapa bagian dengan resolusi tertentu (fasenya sama dengan fase awalnya), yang selanjutnya akan menggantikan input pulsa ultrapendek.

Mask pembagi fase dan bersifat *pseudo-random*, yang diletakkan di tengah dua lensa akan menguraikan komponen-komponen spektral optik sehingga mengalami pemisahan maksimal. Selanjutnya, *mask* akan menambahkan pergeseran fase yang *pseudo-random* (*pseudo-random phase shift*) sebagai kode alamat (*address code*) pada komponen-komponen spektral yang berbeda.

GAMBAR 3.4²²

SPECTRAL ENCODING

Setelah melewati *phase mask*, komponen-komponen spektral akan dikumpulkan kembali oleh lensa dan kisi optik kedua menjadi sinar dengan *beam* tunggal.

Untuk spectral decoder, prosesnya sama dengan apa yang terjadi pada spectral encoder. Hanya saja kode fase spektral dari decoder (decoder's spectral-phase code) merupakan konjugat kompleks (complex conjugate) dari kode fase spektral dari encoder (encoder's spectral-phase code). Sehingga, deretan pulsa akan dikodekan dengan baik bila *encoding mask* dan *decoding mask* merupakan pasangan konjugat kompleks (complex conjugate). Dalam hal ini *spectral phase shifts* akan diabaikan dan pulsa ultrapendek akan direkonstruksi kembali seperti aslinya.

²² Jawad A. Salehi, *Emerging Optical Code-Division Multiple Access Communications Systems*, IEEE Network Magazine, March 1989, hal. 37.

Sebelum pulsa ultrapendek dilewatkan pada *spectral encoder*, pulsa tersebut terlebih dahulu harus memenuhi beberapa karakteristik, seperti yang akan diuraikan berikut ini, agar tidak terjadi distorsi dalam perambatannya.

III. 4. 1. 1. Lebar Pulsa Minimum dan Lebar Pulsa Maksimum²³

Dispersi kecepatan grup dari serat optik (fiber's group-velocity dispersion/GVD) sangat mempengaruhi bentuk temporal dari pulsa optik yang sedang mengalami propagasi. Untuk pulsa-pulsa yang durasinya lebih lebar dari beberapa pikosekon, dispersi kecepatan grup orde kedua sangat dominan. Dispersi jenis ini dapat dikompensasi dengan pengaturan posisi dan orientasi dari kisi (grating) pada encoder dan decoder.

Bila pengaruh dispersi kecepatan grup orde kedua dapat diatasi, maka efek dispersi dari kecepatan grup orde yang lebih tinggi yang akan menyebabkan distorsi. Untuk mengatasinya dipilih lebar pulsa input sekecil mungkin. Semakin kecil lebar atau semakin pendek durasi pulsa input maka semakin lebar spektrumnya, dan akan semakin mudah proses encoding dan decodingnya. Hanya saja, semakin pendek durasi pulsa input, sistemnya menjadi lebih kompleks. Untuk itu lebar pulsa input mesti dipilih dengan hati-hati.

Lebar spektral minimum ($\Delta\lambda$) yang dibutuhkan oleh *spectral encoding*, ditentukan oleh resolusi spektral ($\delta\lambda$) dari kisi (grating) dan jumlah elemen N_c .

²³ X. Steve Yao, Jack Feinberg, Ron Logan, and Lute Maleki, Limitations on Peak Pulse Power, Pulse Width, and Coding Mask Misalignment in a Fiber-Optic Code-Division Multiple-Access System, Journal of Technology, Vol. 11, No. 5/6, May/June 1993, hal. 841.

dalam sebuah kode :

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda/N_c = \lambda^2/2W\sin\gamma \quad (3-9)$$

di mana λ merupakan panjang gelombang tengah (center wavelength) dari pulsa-pulsa laser, W adalah diameter beam, sedangkan γ merupakan sudut api (blaze angle) dari kisi.

Dengan menganggap $\Delta\lambda/\lambda = \Delta\nu/\nu$ dan $\Delta\nu\Delta\tau = \text{konstanta}$ pada persamaan (3-9), akan diperoleh batas lebar maksimum dari pulsa input untuk proses encoding dan decoding yang efektif, yang dirumuskan :

$$\Delta t_{\max} = \text{const } 2W\sin\gamma/N_c c \quad (3-10)$$

di mana c merupakan kecepatan cahaya di ruang hampa dan $\text{const} = 0,442$ untuk pulsa *transform-limited Gaussian* atau $\text{const} = 0,32$ untuk pulsa sech^2 . Dengan menganggap $\sin\gamma = 1$, $W = 10 \text{ mm}$, dan $\text{const} = 0,422$ akan diperoleh :

$$\Delta t_{\max} \simeq 30/N_c (\text{ps}) \quad (3-11)$$

Dari persamaan (3-11) dapat disimpulkan bahwa untuk proses encoding dan decoding yang efektif, dengan panjang kode N_c 7, 31, 127, dan 512 elemen, pulsa input, berturut-turut, harus lebih kecil dari (4,3), (1), (0,24), dan (0,06) ps.

Lebar pulsa minimum dan lebar pulsa maksimum yang memberikan proses encoding dan decoding yang efektif untuk beberapa panjang kode N_c yang berbeda diperlihatkan pada tabel 3.4. Pada tabel tersebut juga dapat dilihat dispersi kecepatan grup (group-velocity dispersion/GVD) orde beberapa yang perlu dikompensasi.

TABEL 3.5

LEBAR PULSA INPUT MAKSIMUM DAN MINIMUM

NO	Δt_{\max} (ps)	Δt_{\min} (ps)	Yang perlu dikompensasi
7	4,3	1,2	2nd order GVD
31	1	0,2	2nd & 3rd order GVD
127	0,24	0,2	2nd & 3rd order GVD
512	0,06	$\approx 0,06$	2nd , 3rd, 4th order GVD

III. 4. 1. 2. Peak Power Pulsa Input Maksimum²⁴

Sifat nonlinearitas serat optik dapat mempengaruhi spektrum frekuensi dari sebuah pulsa, dan dapat juga merubah fase relatif dari komponen-komponen frekuensi pulsanya. Kedua hal tersebut menyebabkan pulsa akan mengalami distorsi saat akan direkonstruksi (proses decoding). Berbeda halnya dengan dispersi kecepatan grup, sifat nonlinearitas ini tak dapat dikompensasi dari luar sehingga menurunkan performansi dari sistem CDMA untuk serat optik.

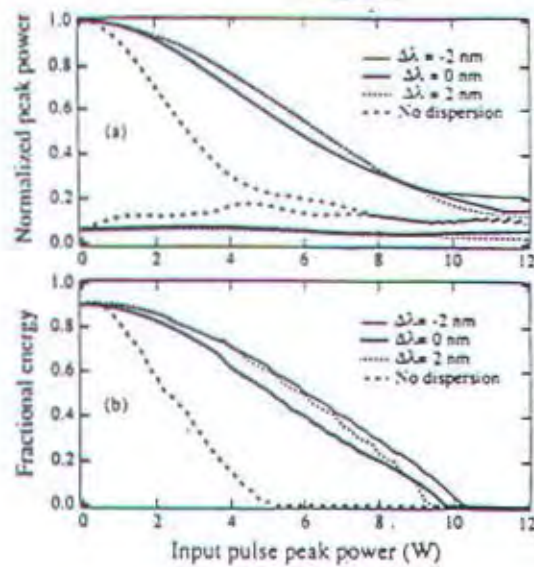
Bagian teratas dari gambar 3.5 dan 3.6 menunjukkan efek nonlinearitas serat optik pada *peak power* pulsa yang didekodekan (direkonstruksi) sebagai fungsi dari *peak power* pulsa input. Panjang kode (code length) yang dipakai adalah 31 dan 127. Pada kedua gambar tersebut, $\Delta\lambda$ merupakan selisih antara panjang gelombang operasi laser dengan panjang gelombang di mana dispersi orde kedua dari serat optik adalah nol. Kurva dari pulsa-pulsa yang didekodekan dengan akurat dimulai dengan power normalisasi satu, sedangkan kurva yang lainnya

²⁴ *ibid*, hal. 842.

menunjukkan pulsa-pulsa yang didekodekan dengan salah (*incorrectly-decoded pulses*). Bagian terbawah dari gambar 3.5 dan 3.6 menunjukkan energi fraksional (*fractional energy*) pulsa setelah melewati perangkat *threshold* (*thresholding device*).

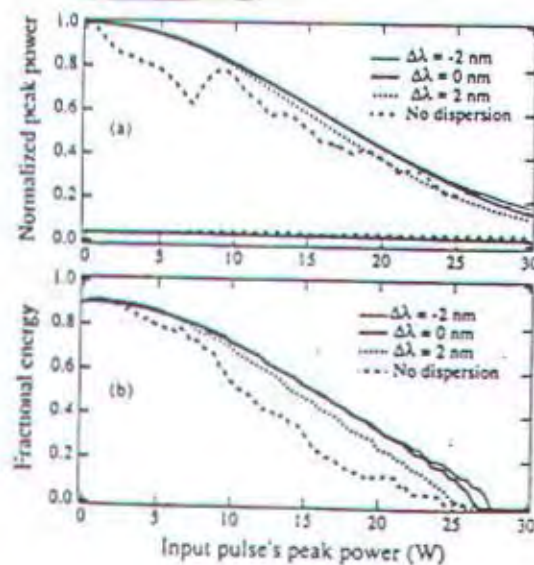
Dari gambar 3.5 dapat dilihat bahwa bila tak terjadi dispersi kecepatan grup, distorsi pulsa yang paling berat diakibatkan oleh modulasi fase sendiri (*self-phase modulation*). Sebaliknya, dalam kasus perambatan pulsa tunggal dalam serat optik tanpa proses *encoding dan decoding*, modulasi fase sendiri tak mengakibatkan distorsi pada bentuk temporal pulsa. Bila dispersi mulai terjadi, distorsi pulsa akan berkurang, karena dispersi kecepatan grup memperlebar durasi pulsa-pulsa optik yang dapat mengurangi intensitas puncak (*peak intensity*) dan akhirnya akan mengurangi efek dari nonlinearitas serat optik. Dari bagian teratas gambar 3.5 dan 3.6 juga terlihat bahwa banyaknya distorsi pulsa yang disebabkan oleh sifat nonlinearitas serat tak tergantung pada panjang gelombang operasi dari laser (*laser's operating wavelength*). Hal ini dapat dijelaskan bahwa pada kasus tersebut dispersi kecepatan grup orde ketiga sangat dominan, dan dispersi orde ketiga itu tidak begitu bervariasi terhadap panjang gelombang operasi laser.

Dengan memakai kriteria *peak power* 80%, *peak power* maksimum yang diperbolehkan untuk pulsa input dengan durasi 0,2 ps dan panjang kode 31, seperti ditunjukkan pada gambar 3.5, adalah sebesar 3,2 W. Sedangkan untuk pulsa input dengan panjang kode 127 didapat *peak power* maksimum sebesar 11 W.

GAMBAR 3.5²⁵

EFEK NONLINEARITAS SERAT OPTIK PADA PULSA TERDEKODE

DENGAN PANJANG KODE =31

GAMBAR 3.6²⁶

EFEK NONLINEARITAS SERAT OPTIK PADA PULSA TERDEKODE

DENGAN PANJANG KODE =127

²⁵ Ibid, hal. 841²⁶ Ibid, hal. 842

III. 4. 1. 3. Peak Power Pulsa Input Minimum²⁷

Peak power pulsa input minimum dipengaruhi oleh besarnya *signal-to-noise ratio* dari penerima. Karena waktu respon (response time) dari penerima elektrik (electrical receiver) jauh lebih lama dari pulsa-pulsa optik, untuk *peak optical power* tertentu maka *peak power* sinyal elektrik akan menurun drastis. *Peak power* pulsa input minimum yang dibutuhkan dapat dihitung dengan persamaan *signal-to-noise ratio* sederhana. Untuk *peak optical power* pada detektor P_o , arus puncak yang terdeteksi (peak detected current) i_o adalah sebesar :

$$i_o = \eta \frac{P_o \Delta t e}{h\nu \tau_e} \quad (3-11)$$

di mana τ_e adalah waktu respon (response) dari penerima, η merupakan efisiensi kuantum dari *photodetector*, Δt merupakan durasi dari pulsa optik, e adalah muatan elektron, dan $h\nu$ sama dengan energi foton. Pada persamaan (3-11), diasumsikan $\tau_e > \Delta t$. Bila $[i_N]$ adalah noise total dari penerima, maka untuk error rate di bawah 10^{-9} , harus didapat :

$$\frac{i_o}{[i_N]} = \frac{\Delta t}{\tau_e} \frac{(P_o e \eta / h\nu)}{(4kT_e / \tau_e R_L)^{1/2}} \geq 12 \quad (3-12)$$

di mana T_e adalah temperatur noise efektif, k merupakan konstanta Boltzman, dan R_L merupakan tahanan beban.

Untuk sistem dengan jumlah N user, sinyal yang keluar dari serat optik akan dibagi menjadi N bagian, sehingga *peak power* yang dikirim ke enkoder harus dinaikkan dengan faktor N : $P_{input} = NP_o / \xi$, di mana ξ merupakan faktor transmisi total untuk serat, dekoder, dan perangkat *thresholding* (thresholding device). Dari persamaan (3-12), akan diperoleh :

²⁷ ibid, hal. 842.

$$P_{\text{input}} \geq \frac{N \tau_c}{\xi \Delta t} P_{\text{min}} = 12 \frac{N \sqrt{\tau_c}}{\xi \Delta t} \text{NEP} \quad (3-13)$$

di mana P_{min} merupakan sensitivitas dari penerima dan NEP adalah noise-equivalent-power, yang dirumuskan sebagai berikut :

$$P_{\text{min}} = 12(h\nu / e\eta)(4kT_c / \tau_c R_L)^{1/2} \quad (3-14)$$

$$\text{NEP} = \left(\sqrt{\tau_c / 12} \right) P_{\text{min}} \quad (3-15)$$

Bila diambil jumlah user sepuluh ($N=10$), faktor transmisi 10% ($\xi=0,1$), pulsa yang dipakai memiliki durasi 200 femtosekon ($\Delta t = 0,2$ ps), dan penerima memiliki sensitivitas -30 dBm pada 1,7 Gb/s, maka dari persamaan (3-13) akan diperoleh peak input power minimum sebelum enkoder sebesar 0,3 W. Level power ini masih cukup rendah untuk menghindari distorsi yang diakibatkan oleh sifat nonlinearitas serat optik.

III. 4. 1. 4. Ketaksejajaran Dekoder Maksimum²⁸

Dalam sistem komunikasi serat optik yang memakai pengkodean spektral (spectrally encoded), *encoding* dan *decoding mask* harus mutlak sejajar. Kesejajaran di sini diartikan bahwa komponen frekuensi yang melewati pusat elemen ke- i dari *encoding phase mask* juga melewati pusat elemen ke- i dari *decoding mask*.

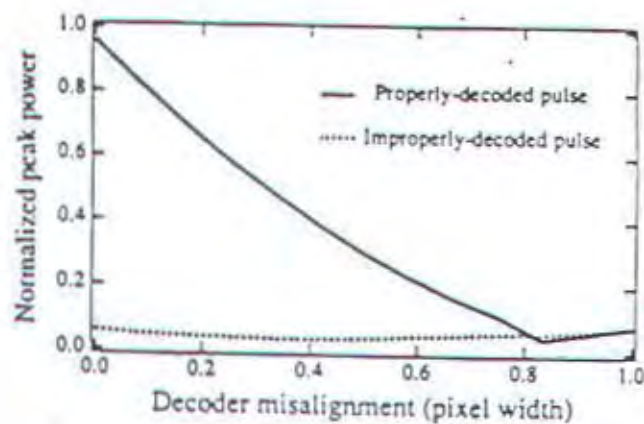
Jika *encoding mask* dan *decoding mask* tak sejajar, dekoder tak akan menghilangkan komponen spektral yang telah berubah fase (spectral phase shift) yang dibangkitkan *encoder mask* bahkan akan menambahkan komponen spektral yang telah berubah fase tersebut pada pulsa yang akan direkonstruksi. Karena itu,

²⁸ ibid, hal. 843.

salah satu pertimbangan penting dalam perancangan sistem ini adalah sejauh mana kesejajaran antara *encoding mask* dengan *decoding mask*.

Gambar 3.7 menunjukkan peak power dari pulsa terekonstruksi dengan baik (*correctly reconstructed pulses*) dan pulsa terekonstruksi jelek (*incorrectly reconstructed pulses*) sebagai fungsi ketaksejajaran mask (*mask misalignment*) yang diukur dalam satuan lebar dari elemen kode tunggal.

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa distorsi terhadap pulsa yang hendak direkonstruksi tak dapat ditoleransi bila terjadi ketaksejajaran mask lebih dari 10% dari lebar elemen kode tunggal (untuk panjang kode 31).



GAMBAR 3.7

EFEK DARI KETAKSEJAJARAN ENCODING-DECODING MASK

III. 4. 2. Fiber Optic Delay line

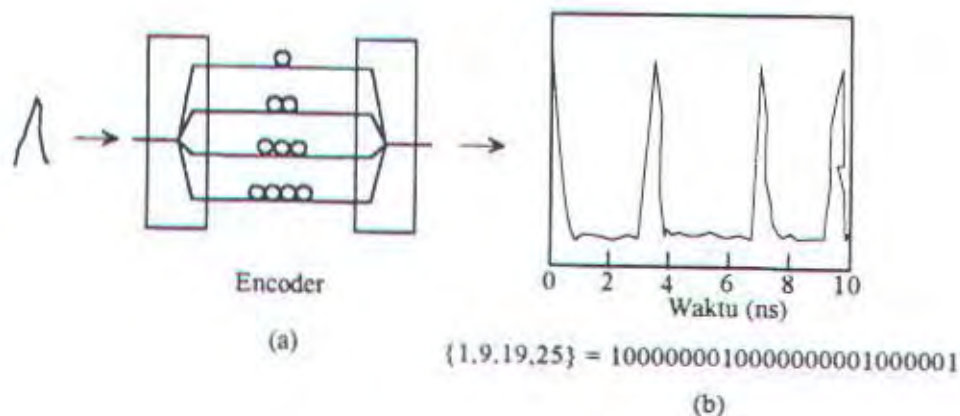
Fiber optic delay line merupakan salah satu jenis encoder-decoder serat optik yang dapat memetakan pulsa optik menjadi sekuen-sekuen optik tertentu. *Fiber optic delay line* ini sebenarnya juga serat optik biasa, yang dapat memberikan delay tertentu pada pulsa yang melewatinya. Encoder dari jenis *fiber optic delay line* ini dibuat dengan cara menggabungkan beberapa serat, yang memiliki delay berbeda, secara paralel.

Pemilihan dari elemen delay tersebut sangat tergantung pada pemilihan kode yang hendak dipakai. Sehingga, bit informasi yang melewati decoder akan diuraikan menjadi pulsa-pulsa optik dengan kode yang telah ditentukan.

Pada sisi penerima ditempatkan decoder yang juga terbuat dari *fiber optic delay line*, hanya saja elemen delaynya merupakan invers dari elemen delay pada encoder. Dengan begitu, akan terjadi proses korelasi antara encoder dengan decoder. Bila elemen delaynya saling invers, maka bit informasi yang telah dikodekan encoder menjadi sekuen-sekuen optik akan direkonstruksi pada decoder menjadi bit-bit informasi kembali.

Gambar 3.8 menunjukkan konfigurasi dari *delay line* encoder dan output dari encoder yang dibaca dengan *optical time domain reflectometer* (OTDR). Pulsa tunggal atau bit informasi yang melewati encoder akan dikodekan menjadi sekuen pulsa tertentu, untuk kemudian dikirim ke decoder. Di decoder, juga jenis *delay line*, sekuen pulsa tersebut akan direkonstruksi kembali menjadi bit informasi semula.

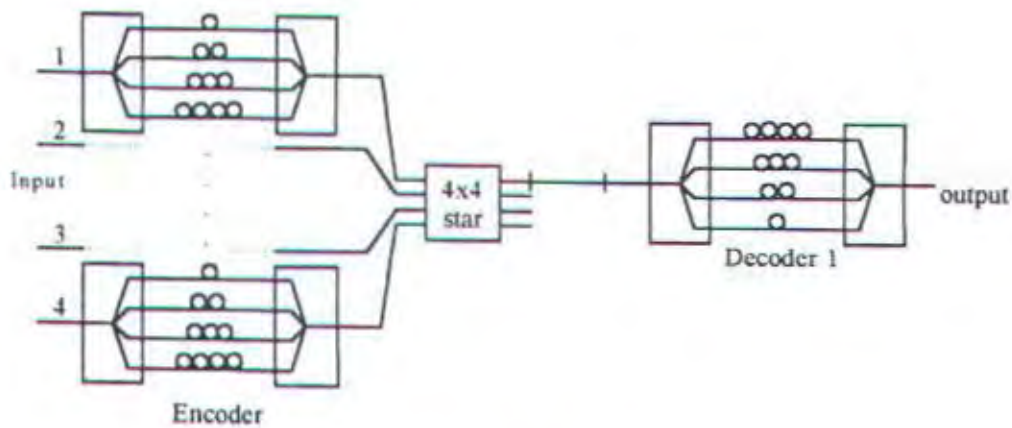
Sedangkan gambar 3.9 menunjukkan konfigurasi dari sistem *optical* CDMA yang menggunakan delay line sebagai encoder-decoder. Bit-bit informasi setiap *user*, setelah melewati encoder akan digabung dalam *star coupler*. Output dari *coupler* ini selanjutnya akan diteruskan ke masing-masing penerima untuk didekodekan menjadi informasi kembali.



GAMBAR 3.8²⁹

ENCODER DAN SEKUEN PULSA

²⁹ Robert M. Gagliardi, Antonio J. Mendez, Mark R. Dale, Eugene Park, *Fiber-Optic Digital Video Multiplexing Using Optical CDMA*, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 11, No. 1, January 1993, hal. 24.

GAMBAR 3.9³⁰

SISTEM CDMA DENGAN DELAY LINE

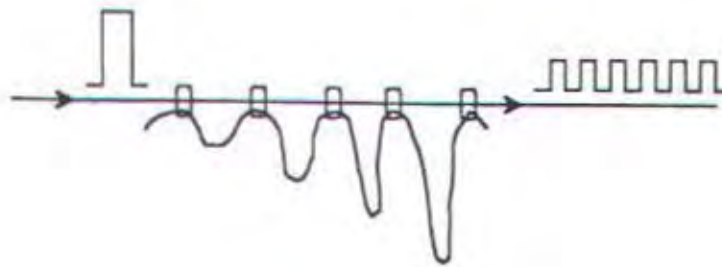
III. 4. 3. Ladder Encoder-Decoder

Ladder encoder-decoder, sama halnya dengan *delay line*, juga memanfaatkan serat sebagai media pengkodean. Sebuah serat dikopel dengan serat optik yang lain sehingga memberikan lintasan baru untuk pulsa yang dilewatkan. Lintasan baru ini dibedakan dengan fase yang berlainan, sehingga sekuen-sekuen pulsa yang terbentuk dapat memenuhi tipe kode yang dipakai.

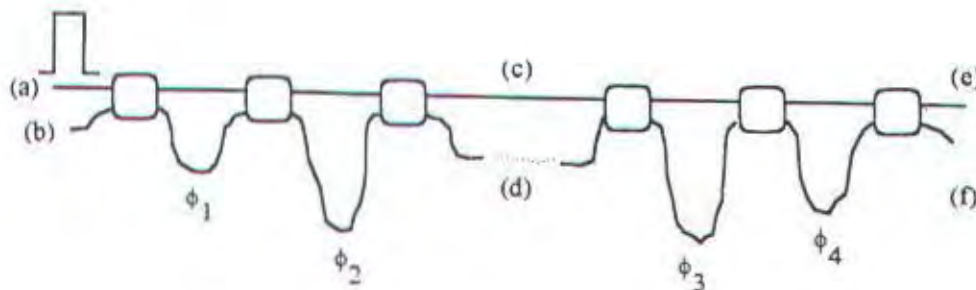
Pada encoder, terjadi proses sebaliknya atau invers dari decoder. Dengan begitu, pulsa yang telah dikodekan akan dapat direkonstruksi kembali menjadi informasi di masing-masing penerima.

Konfigurasi *ladder encoder* ditunjukkan pada gambar 3.10, sedangkan model encoder-decodernya ditunjukkan pada gambar 3.11.

³⁰ ibid. hal. 24.



GAMBAR 3.10³¹
LADDER ENCODER



GAMBAR 3.11³²
PASANGAN LADDER ENCODER-DECODER

Beberapa unsur teknis *optical* CDMA telah diuraikan pada bab ini. Selanjutnya pada bab IV akan dibahas aplikasi CDMA dalam sistem komunikasi serat optik, yang merupakan inti dari pembahasan tugas akhir.

³¹ Michel E. Marhic, Coherent Optical CDMA Network, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 11, No. 5/6, May 1993, hal. 855.

³² *ibid*, hal. 857.

BAB IV

APLIKASI CDMA DALAM

SISTEM KOMUNIKASI SERAT OPTIK

IV. 1. Umum

Sebagaimana telah diketahui bahwa transmisi informasi secara bersamaan dalam satu media dimungkinkan dengan pemanfaatan teknik multipleks. Demikian juga halnya dalam sistem komunikasi serat optik, kapasitas serat optik yang cukup besar itu akan lebih optimal bila dipakai untuk menyalurkan sinyal-sinyal yang telah dimultipleks.

Salah satu teknik multipleks yang baru dikembangkan dalam sistem komunikasi serat optik adalah teknik *optical* CDMA. Sebenarnya CDMA sendiri telah lama berkembang dalam sistem komunikasi radio. Namun aplikasi CDMA dalam komunikasi serat optik masih tergolong baru dan belum begitu populer. Untuk itu pada bab ini, yang merupakan inti dari pembahasan tugas akhir, akan dibahas aplikasi CDMA dalam sistem komunikasi serat optik yang melingkupi macam-macam teknik multipleks *optical* yang telah ada disertai dengan penampilan sistemnya serta analisa dan perbandingan dari berbagai macam teknik *optical* CDMA tersebut.

IV. 2. Teknik-teknik Multipleks Optical CDMA

Seperti telah dijelaskan pada bab II dan bab III, secara umum pada teknik multipleks *optical* CDMA, terdapat sejumlah N pasangan pemancar-penerima atau *user* yang dapat berkomunikasi dalam waktu yang bersamaan (*simultan*) dan melalui satu kanal serat optik yang sama. Yang membedakan informasi dari setiap pemancar adalah kode-kode yang digunakan masing-masing pemancar, biasa disebut *address codes* atau *signature sequences*. Kode-kode ini memegang peranan penting dalam pemetaan sinyal informasi menjadi sekuen-sekuen pulsa. Setiap pemancar mengkodekan informasinya secara unik dan setiap penerima yang dituju memiliki kode komplementer untuk mendapatkan sinyal yang dibutuhkan. Jadi, setiap adanya pengiriman informasi, semua penerima pasti mendapatkan sinyal dari informasi tersebut. Hanya saja, penerima yang memiliki kode yang sama dengan pemancar itulah yang dapat merekonstruksi sinyal tersebut menjadi informasi. Sedangkan penerima yang tidak memiliki kode yang sama dengan pemancar akan menganggap sinyal tadi sebagai *noise* saja.

Beberapa teknik multipleks *optical* CDMA yang telah dikembangkan didasari pada jenis kode yang dipakai serta metode modulasi yang digunakan. Teknik-teknik multipleks tersebut, antara lain :

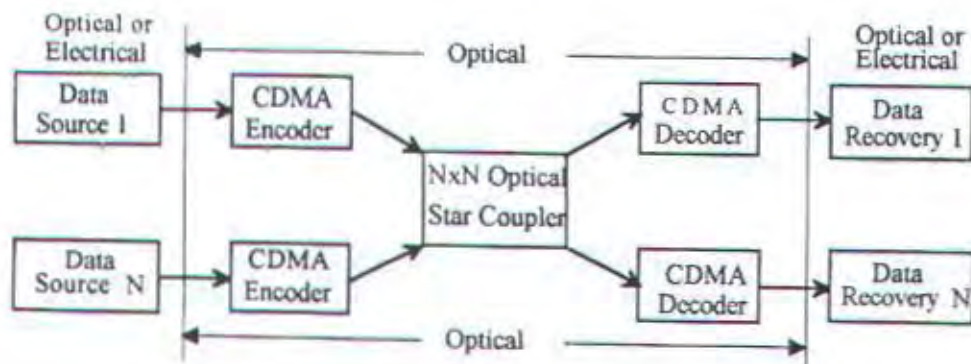
1. *Optical Orthogonal Codes* CDMA (OOC CDMA).
2. *Random Carrier* CDMA (RC CDMA).
3. *Bipolar Codes* CDMA.
4. *Pulse Position Modulation* CDMA (PPM CDMA).

IV. 3. Optical Orthogonal Codes CDMA (OOC CDMA)³³

Optical Orthogonal Codes CDMA (OOC CDMA) merupakan jenis CDMA yang memanfaatkan kode optik ortogonal sebagai metode pengkodeannya. Kode optik ortogonal sebagaimana telah diuraikan sebelumnya merupakan kode yang memiliki sifat autokorelasi dan korelasi silang yang baik. Dengan begitu kode optik ortogonal memenuhi persyaratan untuk diaplikasikan dalam sistem CDMA untuk optik.

IV. 3. 1. Prinsip Operasi

Blok diagram dari jaringan CDMA untuk optik dapat dilihat kembali pada gambar 4.1. Terdapat sejumlah M user pada jaringan yang memanfaatkan serat



GAMBAR 4.1

MODEL OOC CDMA DALAM KONFIGURASI BINTANG

³³ Jawad A. Salehi, Charles A. Brackett, Code Division Multiple-Access Techniques in Optical Fiber Networks-Part II : Systems Performance Analysis, IEEE Transactions on Communications, Vol. 37, No. 8, August 1989, hal. 834-842.

optik yang sama sebagai media transmisi. Sinyal optik yang ditransmisikan oleh salah satu user dikodekan oleh CDMA *encoder* untuk mengurangi efek destruktif dari interferensi dengan sinyal-sinyal yang ditransmisikan oleh transmitter yang lain. Penerima mendapatkan sinyal superposisi dari semua sinyal yang dikirim oleh user aktif dan mencoba *me-recover* data yang dikirim oleh pasangan pemancarnya dengan melakukan proses inversi dari proses pengkodean yang dilakukan usernya (decoding).

Semua user dalam jaringan memiliki *code word* kode optik ortogonal yang unik (dapat dibedakan). Sebuah *code word* terdiri dari F chip, berdurasi τ_c , dengan $T_b = F\tau_c$ yang merupakan durasi dari satu bit informasi. Bobot dari chip, K , menunjukkan adanya pendudukan chip oleh pulsa-pulsa *short light*. User-user dalam jaringan mengirim datanya dalam format modulasi "on-off", sehingga untuk bit "0", menunjukkan user tidak mengirimkan pulsa, sedangkan untuk bit "1" menunjukkan user mengirimkan kode-kode optik ortogonal. Penerima akan mengecek pendudukan dan posisi pulsa dengan bobot K yang semestinya diduduki oleh pasangan pemancarnya. Lalu penerima akan membandingkan jumlah pulsa pada posisi tersebut dengan *level thresholdnya*.

Dengan mengabaikan *thermal noise* dan *quantum noise*, tidak ada error yang dapat terjadi bila data bitnya "1", dan saat bitnya "0" error akan terjadi bila level sinyal-sinyal yang menyebabkan interferensi sama dengan level threshold pulsa, Th .

IV. 3. 2. Penampilan Sistem

Dalam jaringan komunikasi *optical CDMA*, terdapat sejumlah N pasangan pemancar dan penerima (user). Seperti ditunjukkan pada gambar 4.2. Untuk analisa performansinya diasumsikan komunikasi antara pemancar dan penerima bersifat *pair wise*, dan komunikasi antara setiap pasangan pemancar-penerima ke- n bersifat berurutan.

Sinyal *baseband* ke- n , $s_n(t)$, pada output *optical encoder* ke- n dirumuskan dengan persamaan :

$$s_n(t) = s_n b_n(t) DP_n(t) \quad (4-1)$$

di mana s_n , $b_n(t)$ dan $DP_n(t)$ berturut-turut merupakan intensitas cahaya, sinyal data biner, dan kode optik ortogonal yang ditransmisikan dari user ke- n .

Sinyal data biner dari user ke- n , $b_n(t)$, untuk *continous communication* diberikan oleh persamaan :

$$b_n(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_l^{(n)} P_T(t - lT) \quad (4-2)$$

di mana $b^{(n)} = (b_l^{(n)})$ adalah sekuen data ke- n yang mengambil digit "0" atau "1" (on-off keying) untuk setiap l dengan probabilitas yang sama dan $P_T(t)$ merupakan pulsa *rectangular* dengan durasi T yang dimulai pada saat $t = 0$. Selanjutnya $DP_n(t)$, kode optik ortogonal dari user ke- n , dirumuskan oleh persamaan :

$$DP_n(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} A_j^{(n)} P_{T_c}(t - jT_c) \quad (4-3)$$

di mana $P_{T_c}(t)$ adalah pulsa empat persegi (*rectangular*) dengan durasi T_c dan $A^{(n)} = (A_j^{(n)})$ adalah sekuen periodik ke- n dari pulsa-pulsa optik biner (0,+1) dengan periode (length) $F = T/T_c$, di mana $A_{j \cdot F}^{(n)} = (A_j^{(n)})$, dan dengan bobot (weight) K .

Pemancar-pemancar tidak saling *time synchronous*, seperti ditunjukkan pada gambar 4.1, sinyal yang diterima di sisi penerima merupakan :

$$r(t) = \sum_{n=1}^N s_n(t - \tau_n) \quad (4-4)$$

di mana τ_n merupakan waktu delay yang berhubungan dengan sinyal ke-n. Dari persamaan (4-1) dan (4-4) diperoleh :

$$r(t) = \sum_{n=1}^N b_n(t - \tau_n) DP_n(t - \tau_n) \quad (4-5)$$

Dari persamaan (4-1) telah diasumsikan $s_n=1$ untuk $1 \leq n \leq N$ (amplitudo juga diasumsikan sama). Diasumsikan juga $\tau_n=0$ dalam menganalisa penerima yang *match* dengan sinyal ke-n, di mana $0 \leq |\tau_n| \leq T$, untuk $1 \leq n \leq N$. Receiver ke-n diasumsikan sebagai *correlation receiver* (matched filter) yang *match* dengan sinyal ke-n. Dalam pengolahan sinyal optik, proses korelasi ke-n dapat dibuat dengan *fiber optic delay line* dengan impulse response yang ekuivalen dengan *time reversal* dari kode optik ortogonal sinyal ke-n, diikuti dengan *photodetector* ideal dan sebuah *sampler*. Untuk kemudahan penulisan, diasumsikan sinyal user yang diinginkan diwakili oleh $n=1$ dalam persamaan (4-5). Gambar 4.2 merupakan korelator optik tipikal untuk user 1 dan gambar 4.3 merupakan ekuivalensi dari *optical match filter* di mana Z_1 merupakan output yang tersampel dari korelator optik maupun ekuivalen *matched filter* pada $t=T$. Pengaruh dari sinyal yang berasal dari user ke-n pada receiver pertama disimbolkan dengan $I_n^{(1)}$. Sehingga, Z_1 , output dari korelator user pertama pada saat T , dapat ditulis :

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{1}{T_c} \int_0^T r(t) DP_1(t) dt \\ &= b_0^{(1)} K + I_1 \end{aligned} \quad (4-6)$$

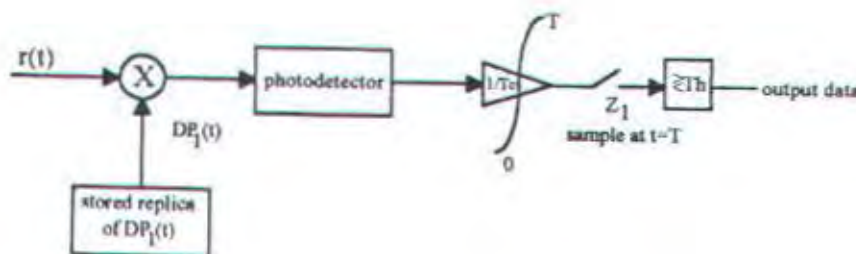
di mana $b_0^{(1)}$ merupakan data ke nol dari user pertama yang dapat berada pada dua nilai, yaitu 0 atau 1 dengan probabilitas yang sama. Suku pertama dari persamaan (4-6), $b_0^{(1)}K$, merupakan sinyal yang diinginkan. Sedangkan suku kedua dari persamaan (4-6), I_1 , merupakan sinyal yang tidak diinginkan (total interference signal) di output dari korelator penerima yang diinginkan, yakni penerima pertama. Sinyal yang tidak diinginkan I_1 terbentuk dari $(N-1)$ sinyal-sinyal interferensi $I_n^{(1)}$ di mana setiap $I_n^{(1)}$ merupakan variabel acak dengan *mean* $M^{(1)}_{in}$ dan varian $\tau^{2(1)}_{in}$. Bila $I_n^{(1)}$ independen dan merupakan variabel random terdistribusi sama, maka *mean* M_{11} dan varian τ^2_{11} dari total interferensi sinyal I_1 dapat ditulis sebagai :

$$M_{11} = (N-1)M \quad (4-7)$$

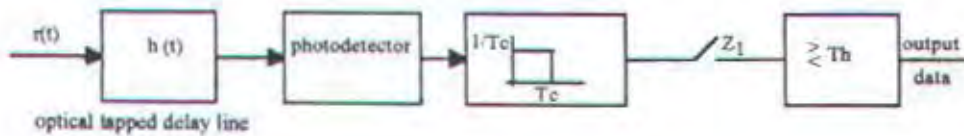
dan

$$\tau^2_{11} = (N-1)\tau^2 \quad (4-8)$$

di mana $M = M^{(1)}_{in}$ dan $\tau^2 = \tau^{2(1)}_{in}$ untuk $2 \leq n \leq N$.



GAMBAR 4.2
KORELATOR OPTIK IDEAL



GAMBAR 4.3

OPTICAL MATCHED FILTER

IV. 3. 2. 1. Probability Density Function

Dalam perhitungan *probability density function* untuk sinyal interferensi I_i pada persamaan (4-6), akan dipertimbangkan dua kasus, yaitu : A) *chip synchronous* dan B) *ideal chip asynchronous* yang mengasumsikan tidak adanya pulsa-pulsa yang berdekatan diantara setiap dua kode optik ortogonal. Konsiderasi di atas didapatkan atas kenyataan perhitungan *probability density function* secara eksak untuk I_i akan membutuhkan informasi *probability density function* yang berkaitan untuk setiap $I_n^{(i)}$ untuk $2 \leq n \leq N$. Karena ada N user dalam sistem *optical CDMA* dan sinyal interferensi I_j pada output dari penerima ke- j terdiri dari $(N-1)$ suku interferensi maka harus diketahui pula sebanyak $N(N-1)/2$ *probability density function*. Untuk menghitung sejumlah $N(N-1)/2$ *probability density function* dengan N yang cukup besar ternyata amat sulit dan membutuhkan waktu. Karena itu, dipakai dua kasus interferensi ekstrem, *chip synchronous* dan *ideal chip asynchronous* seperti di atas. Sehingga analisa *probability density function* dan *probability of error* secara matematis dapat lebih umum dan mudah.

Sinyal interferensi I_1 merupakan jumlah dari $(N-1)$ variabel independen yang terdistribusi sama, $I_n^{(1)}$. Sehingga, *probability density function* untuk I_1 , $P_{I_1}(I_1)$, merupakan konvolusi dari *probability density function* variabel random $I_n^{(1)}$, untuk $2 \leq n \leq N$. *Probability density function* untuk sinyal interferensi I_1 untuk dua kasus tersebut dapat ditulis :

A). *Chip Synchronous*

$$P_{I_1}(I_1) = \sum_{i=0}^{N-1} \binom{N-1}{i} \left(\frac{K^2}{2F}\right)^i \left(1 - \frac{K^2}{2F}\right)^{N-1-i} \delta(I_1 - i) \quad (4-9)$$

B). *Ideal Chip Asynchronous*

$$P_{I_1}(I_1) = q^{N-1} \delta(I_1) + (N-1)pq^{N-2} |I_1| + \binom{N-1}{2} p^2 q^{N-3} f(I_1) + \sum_{i=3}^{N-1} \binom{N-1}{i} p^i q^{N-1-i} G\left(\frac{i}{2}, \frac{i}{12}\right) \quad (4-10)$$

di mana $p = K^2/F$, $q = 1 - K^2/F$ dan

$$|I_1| \triangleq \begin{cases} 1 & 0 < I_1 < 1 \\ 0 & \text{yang lain} \end{cases} \quad (4-11)$$

dan

$$f(I_1) \triangleq \begin{cases} 1 - |I_1 - 1| & 0 \leq I_1 \leq 2 \\ 0 & \text{lain} \end{cases} \quad (4-12)$$

dan G merupakan *Gaussian density function* dengan *mean* $i/2$ dan varian $i/12$.

IV. 3. 2. 2. Probability of Error

Karena hubungan antarvarian, *probability of error* (PE) yang didapat untuk kasus *chip synchronous* (kasus A) merupakan *upper bound* (batas atas) dari PE eksak, dan PE yang didapat untuk kasus *ideal chip asynchronous* (kasus B) merupakan *lower bound* (batas bawah) dari PE eksak, sehingga dapat ditulis :

$$PE[\text{kasus B}] \leq PE[\text{eksak}] < PE[\text{kasus A}] \quad (4-13)$$

Probability of error eksak per bit ($PE[\text{eksak}]$), didefinisikan sebagai :

$$PE[\text{eksak}] = \Pr(Z_1 \geq Th/b_0^{(1)} = 0) \cdot \Pr(b_0^{(1)} = 0) + \Pr(z_1 < Th/b_0^{(1)} = 1) \cdot \Pr(b_0^{(1)} = 1) \quad (4-14)$$

Di mana Th didefinisikan sebagai *threshold*. Suku kedua dalam persamaan (4-14) adalah "0" untuk $0 \leq Th \leq K$ karena $\Pr(Z_1 < Th/b_0^{(1)} = 1) = \Pr(K-Th+I_1 < 0) = \Pr(\eta < 0)$ di mana $\eta = K-Th+I_1$ adalah variabel random definit nonnegatif yang nilainya tidak negatif. Sehingga, PE bila $b_0^{(1)} = 1$ adalah nol. Namun bila $b_0^{(1)} = 0$, argumen di atas menjadi tidak benar dan error dapat terjadi. Error ini berasal dari suku pertama pada persamaan (4-14), yaitu :

$$PE[\text{eksak}] = \frac{1}{2} \int_{Th}^{\infty} P_{I_1}(I_1) dI_1 \quad (4-15)$$

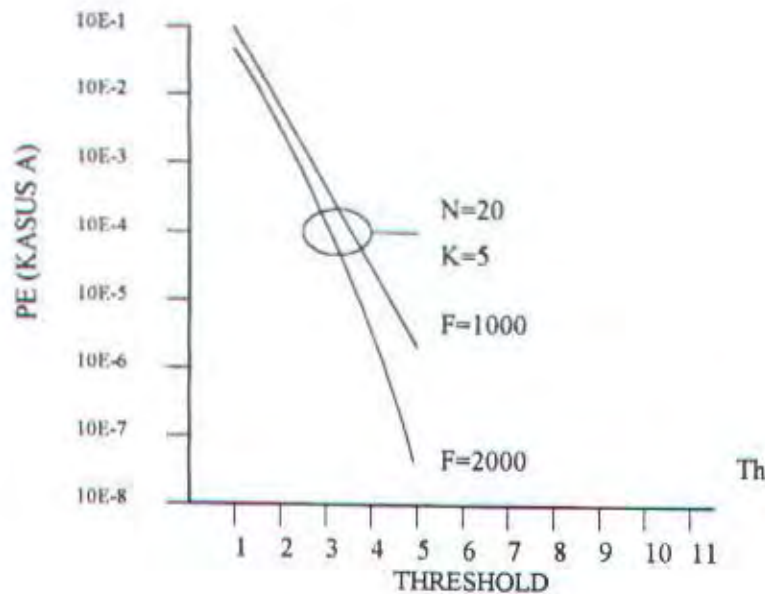
A). *Chip Synchronous (upper bound / batas atas)*

Dalam kasus ini PE-nya dapat dinyatakan dalam :

$$PE[\text{kasus A}] = \frac{1}{2} \sum_{i=Th}^{N-1} \binom{N-1}{i} \left(\frac{K^2}{2F}\right)^i \left(1 - \frac{K^2}{2F}\right)^{N-1-i} \quad (4-16)$$

Gambar 4.4 menunjukkan PE[kasus A] versus *threshold* untuk jumlah user yang tetap ($N=20$) dan dengan bobot ($K=5$) serta dengan ukuran chip yang berbeda.

Sebagaimana yang diharapkan, bila jumlah chip per frame, F , menurun, maka performansi sistem juga mengalami degradasi, atau sebaliknya. Namun margin degradasinya rendah. Hasil yang lebih menarik digambarkan pada gambar 4.5 di mana PE[kasus A] versus *threshold* ditunjukkan untuk jumlah user yang tetap ($N=10$) dan ukuran chip yang tetap pula ($F=1000$), tetapi untuk bobot, K , yang berlainan ($K=1,2,3,5,7,9$). Untuk $K=1$, *threshold* diset "1", dan didapat *error rate* sekitar 2.1×10^{-3} . Bila diinginkan perbaikan pada performansi sistem, maka akan dibutuhkan untuk memakai lebih banyak pulsa dalam sekuen-sekuen. Dengan



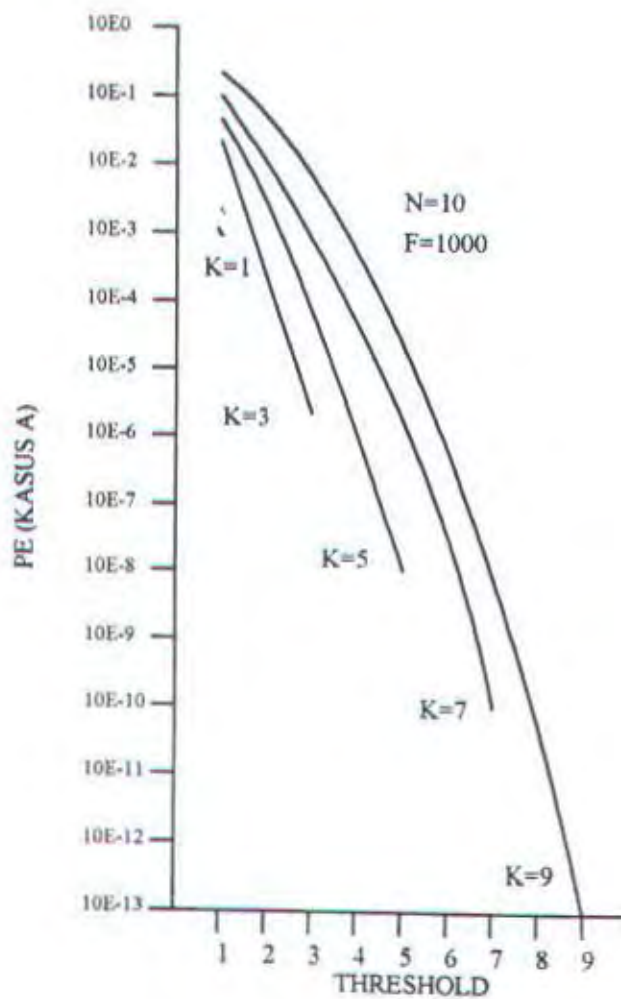
GAMBAR 4.4

BIT ERROR RATE VERSUS THRESHOLD (UPPERBOUND)

UNTUK $N=20$, $K=5$, DAN $F=1000, 2000$

memakai lebih banyak pulsa, maka level *threshold* dapat ditingkatkan. Bila jumlah pulsa ditambah dan level *threshold* dibiarkan rendah seperti pada kasus sebelumnya, performansi sistem akan menurun karena dengan menambah jumlah pulsa dalam suatu frame, kanal akan lebih rapat serta probabilitas mengenai chip yang dituju menjadi semakin besar (K^2/F). Tetapi saat level *threshold* semakin tinggi, performansi sistem menjadi semakin baik karena kemungkinan pendudukan chip tertentu sampai pada level *threshold* oleh berbagai user menjadi lebih kecil.

Karakteristik performansi sistem *optical* CDMA yang memakai kode optik ortogonal seperti inilah yang ditunjukkan pada gambar 4.5. Sebagai contoh, Bila nilai K bergerak sampai 9 dan level *threshold* dijaga tetap pada "1", performansi sistem yang memiliki $K=1$ menurun, tetapi bila level *threshold* dibuat lebih tinggi



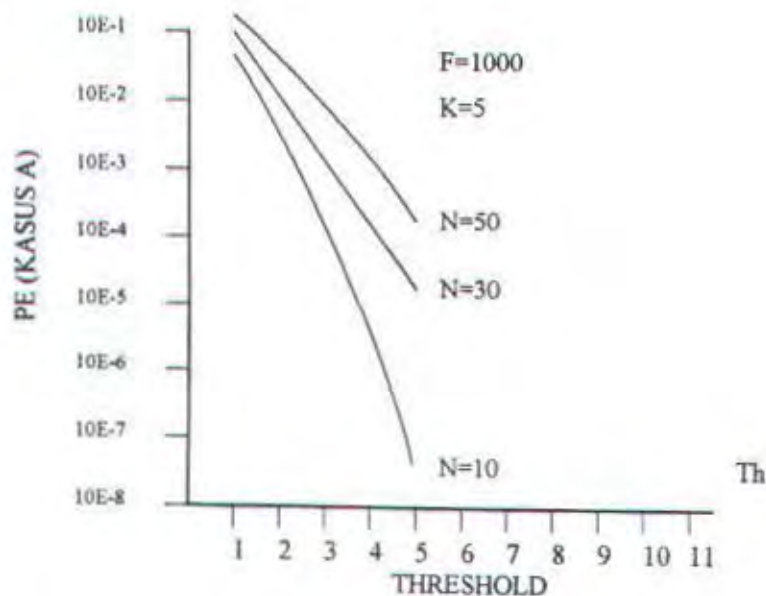
GAMBAR 4.5

BIT ERROR RATE VERSUS THRESHOLD (UPPERBOUND)

UNTUK $N=10$, $F=1000$ DAN $K=1, 3, 5, 7, 9$

performansi sistemnya menjadi lebih baik. Untuk $K=9$ dan $Th=9$ *error rate*-nya bisa mencapai sekitar 10^{-13} . *Error rate* ini sepuluh kali lebih baik bila dibandingkan dengan *error rate* pada $K=1$.

Kasus khusus akan muncul bila jumlah pulsa pada kode optik ortogonal yang dipakai jauh lebih besar dari jumlah user itu sendiri. Dalam kasus ini, yang dapat dijaga secara ideal menjadi nol hanya error akibat interferensi. Sebagai contoh, jika $F=1000$, $N=10$, $K=10$, dan $Th=10$, secara ideal error akibat sinyal interferensi adalah nol karena level maksimum sinyal interferensi yang akan terjadi adalah $N-1=9$, dimana selalu lebih kecil dari $Th=10$.



GAMBAR 4.6

BIT ERRO RATE VERSUS THRESHOLD (UPPERBOUND)

UNTUK $F=1000$, $K=5$ DAN $N=50,30,10$

Gambar 4.6 menunjukkan PE[kasus A] versus *threshold* dengan jumlah chip yang tetap, $F=1000$, bobot, $K=5$, dan dengan jumlah user (N) yang berbeda. Pada $Th=5$ dan $N=10$, $PE[kasus A] = 1.8 \times 10^{-8}$, dan untuk level *threshold* yang sama saat $N=50$, $PE[kasus A] = 1.8 \times 10^{-4}$. Dengan kata lain performansi sistemnya turun menjadi empat kali semula.

B). *Ideal Chip Asynchronous (lower bound / batas bawah)*.

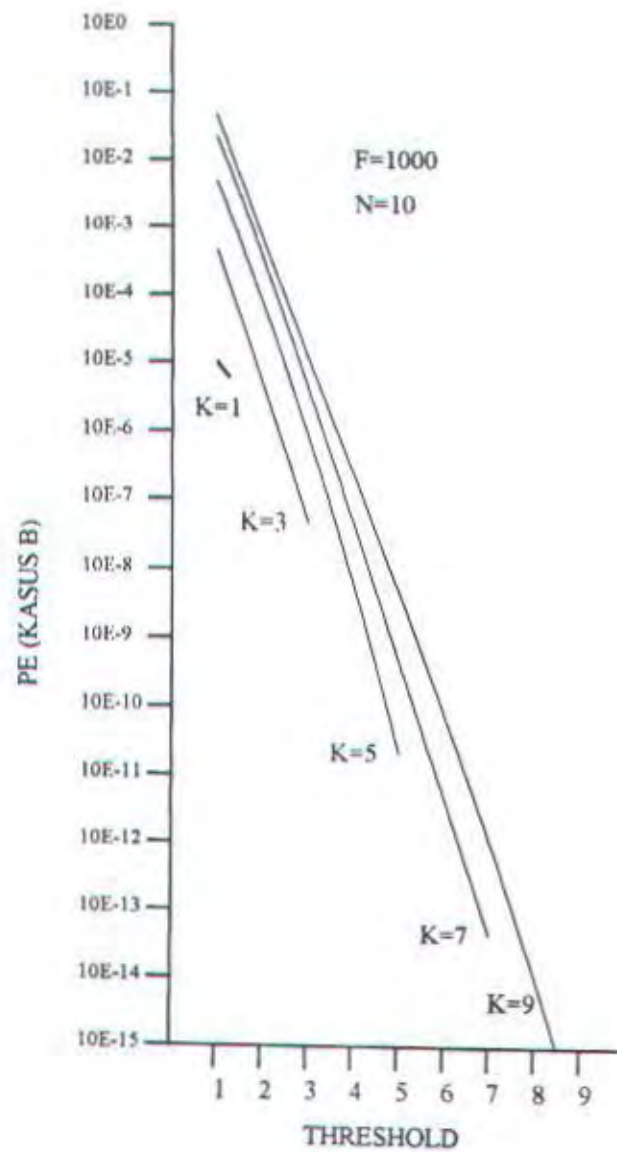
Pada kasus ini PE-nya dapat dinyatakan dalam :

$$PE[kasus B] = \frac{1}{2}q^{N-1} \int_{Th}^{\infty} \delta(I_1) dI_1 + \frac{1}{2}(N-1)pq^{N-2} \cdot \frac{1}{2} \int_{Th}^{\infty} |\overline{I_1}| dI_1 + \frac{1}{2} \binom{N-1}{2} p^2 q^{N-3} \cdot \int_{Th}^{\infty} f(I_1) dI_1 + \frac{1}{2} \sum_{i=3}^{N-1} \binom{N-1}{i} + \frac{1}{2} p^i q^{N-1-i} Q\left(\frac{Th - \frac{1}{2}}{\sqrt{\frac{1}{12}}}\right) \quad (4-17)$$

di mana $Q(x)$ merupakan fungsi integral Gaussian dan didefinisikan sebagai :

$$Q(x) \triangleq \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right) d\mu \quad (4-18)$$

Gambar 4.7 menunjukkan PE[kasus B] dari persamaan (4-17) versus *threshold* untuk jumlah user yang tetap ($N=10$) dan jumlah chip yang tetap pula ($F=1000$) serta dengan bobot yang berbeda ($K=1,3,5,7,9$). Seperti yang diharapkan, performansi dari sistem *chip asynchronous*, PE[kasus B], lebih baik daripada performansi sistem *chip synchronous*, PE[kasus A]. Sebagai contoh, untuk $K=5$ dan $Th=5$ PE[kasus A] sekitar 1.8×10^{-8} seperti ditunjukkan pada gambar 4.5, sedangkan untuk PE[kasus B] dengan parameter yang sama didapat PE sekitar



GAMBAR 4.7

BIT ERROR RATE VERSUS THRESHOLD (LOWERBOUND)

UNTUK $N=10$, $F=1000$ DAN $K=1,3,5,7,9$

5.7×10^{-11} . Secara intuitif, didapat bahwa pada kasus *ideal chip asynchronous* untuk menduduki satu chip pulsa dari sinyal user yang diharapkan dibutuhkan paling sedikit dua sinyal user, sedangkan pada kasus *chip synchronous* satu chip milik user yang diinginkan dapat diduduki hanya oleh satu sinyal interferen. Karena itu, jumlah efektif dari sinyal interferensi pada kasus *ideal asynchronous* lebih kecil daripada kasus *synchronous*. Sebagaimana pada kasus *synchronous*, pada $PE[\text{kasus B}]$ performansi sistem juga akan lebih baik bila jumlah pulsa dalam sekuen kode optik ortogonal diperbanyak dan pada saat yang sama level *threshold*-nya juga dinaikkan.

IV. 3. 2. 3. Optical Hard Limiter

Salah satu cara untuk memperbaiki performansi sistem pada FO-CDMA adalah dengan mengurangi efek dari intensitas sinyal interferensi. Salah satu cara untuk mengurangi efek interferensi ini adalah dengan menempatkan sebuah *optical hard-limiter (optical threshold element)* sebelum *optical tapped-delay line*.

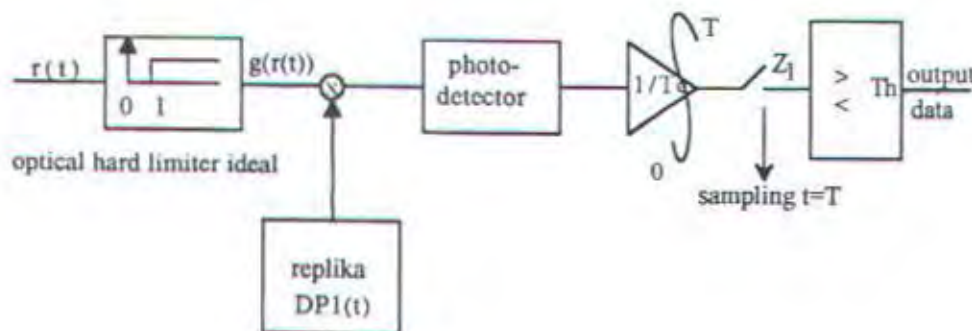
Sebuah *optical hard-limiter* ideal didefinisikan sebagai :

$$g(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 1 \\ 0, & 0 \leq x < 1 \end{cases} \quad (4-19)$$

Sehingga, bila intensitas cahaya optik (x) lebih besar dari atau sama dengan satu, maka perangkat *hard limiter* akan membatasi intensitas tersebut menjadi satu kembali. Bila intensitas cahayanya lebih kecil dari satu, maka respon dari *hard limiter* akan menunjukkan nol. Proses nonlinear ideal seperti ini dapat memperbaiki performansi sistem karena *hard limiter* akan meniadakan beberapa kombinasi dari pola interferensi yang menyebabkan terjadinya error seperti pada

kasus *soft limiter*, yakni pola penyebab error karena penjumlahan analog dari intensitas cahaya daripada reproduksi eksak dari pola khusus tanpa efek analog. Sebagai contoh, kode optik ortogonal $A'=[1011000100000]$ memiliki nilai maksimum "4" pada output *matched filter*-nya (korelator). Sekuen yang muncul akibat interferensi dengan bentuk $[3000000100000]$ juga memiliki nilai maksimum "4" pada output korelator A' , yang akan menyebabkan terjadinya error bila *threshold* diset pada nilai 4. Namun bila pola interferensi dibatasi dengan hard limiter, maka sekuen tadi akan menjadi $[1000000100000]$. Pola ini memiliki nilai maksimum "2" pada waktu korelasi dan tidak menyebabkan terjadinya error pada output *decision circuit* bila *threshold*-nya diset pada "4".

Secara umum, sinyal yang diterima $r(t)$ pada persamaan (4-4) dilewatkan melalui *optical hard limiter* seperti terlihat pada gambar 4.8 sebelum dikorelasikan



GAMBAR 4.8

PENERIMA DENGAN OPTICAL HARD LIMITER

dengan korelator optik penerima yang dituju. Jadi, sinyal interferensi I_1 pada output korelator yang dituju (user pertama) dapat dituliskan :

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{T_c} \int_0^T g(I_1(t)) DP_1(t) dt \\ &= \sum_{j=0}^{K-1} V_1^{(1)} A_j^{(1)} \end{aligned} \quad (4-20)$$

dalam kasus ini, "1" merupakan nilai normalisasi untuk intensitas yang diberikan, di mana

$$I_1(t) \triangleq \sum_{n=2}^N s_n(t - \tau_n) \quad (4-21)$$

dan $V_j^{(1)}$ didefinisikan sebagai :

$$V_j^{(1)} = \frac{1}{T_c} \int_{jT_c}^{(j+1)T_c} g(I_1(t)) dt \quad (4-22)$$

a). Probability Density Function

Probability density function untuk sinyal interferensi setelah pemanfaatan perangkat *hard limiter* juga didasarkan pada dua kasus seperti seperti yang telah dibahas sebelumnya.

Untuk kasus *chip synchronous* (kasus A) variabel random $V_j^{(1)}$ dapat dituliskan sebagai berikut :

$$V_j^{(1)} \triangleq \begin{cases} 1 & \text{jika } I_1(t) \geq 1 \text{ untuk } jT_c \leq t \leq (j+1)T_c \\ 0 & \text{jika } I_1(t) = 0 \text{ untuk } jT_c \leq t \leq (j+1)T_c \end{cases} \quad (4-23)$$

Sehingga, *probability density function* untuk variabel random $V_j^{(1)}$ adalah :

$$P_{V_j^{(1)}}(V_j^{(1)}) = q' \delta(V_j^{(1)}) + p' \delta(V_j^{(1)} - 1) \quad (4-24)$$

di mana dari persamaan (4-10) didapat :

$$q' \triangleq \Pr[I_1(t) = 0 \text{ untuk } jT_c \leq t \leq (j+1)T_c] = q^{N-1} \quad (4-25)$$

dengan cara yang sama didapat pula :

$$p' \triangleq \Pr(I_1(t) \geq 1 \text{ untuk } jT_c \leq t \leq (j+1)T_c)$$

$$\begin{aligned}
&= 1 - \Pr(I_1(t) = 0 \text{ untuk } jT_c \leq t \leq (j+1)T_c) \\
&= 1 - q'
\end{aligned} \tag{4-26}$$

di mana q dan p untuk kasus *hard limiter* didefinisikan sebagai berikut :

$$q \triangleq \Pr(b_0^{(n)} A_j^{(n)} = 0) = 1 - \frac{K}{2F} \tag{4-27}$$

dan

$$p \triangleq \Pr(b_0^{(n)} A_j^{(n)} = 1) = \frac{K}{2F} = 1 - q \tag{4-28}$$

di mana $b_0^{(n)}$ berhubungan dengan data ke- n dari user ke- n yang dapat berada dalam dua nilai "1" atau "0" dengan probabilitas $1/2$. Dan $A_j^{(n)}$ berhubungan dengan posisi ke- j dari kode optik ortogonal user ke- n dan juga berada dalam dua nilai "1" atau "0" dengan $\Pr(A_j^{(n)} = 1) = K/F$ dan $\Pr(A_j^{(n)} = 0) = 1 - K/F$.

Sedangkan untuk kasus *ideal chip asynchronous* (kasus B), variabel random $V_j^{(1)}$ didefinisikan sebagai :

$$\begin{aligned}
0 < V_j^{(1)} &\leq 1 && \text{jika } I_1(t) > 0 \text{ untuk } jT_c \leq t \leq (j+1)T_c \\
V_j^{(1)} &= 0 && \text{jika } I_1(t) = 0 \text{ untuk } jT_c \leq t \leq (j+1)T_c
\end{aligned} \tag{4-29}$$

Sehingga, *probability density function* untuk variabel random $V_j^{(1)}$ di atas adalah :

$$P_{V_j^{(1)}}(V_j^{(1)}) = q' \delta(V_j^{(1)}) + p' \left| \overline{V_j^{(1)}} \right| \tag{4-30}$$

di mana

$$q' \triangleq \Pr(I_1(t) = 0 \text{ dalam satu waktu chip}) = q^{N-1} \tag{4-31}$$

dan

$$p' \triangleq \Pr(I_1(t) > 0 \text{ dalam satu waktu chip}) = 1 - q^{N-1} \tag{4-32}$$

di mana q dan p untuk *chip asynchronous* didefinisikan sebagai :

$$q \triangleq 1 - \frac{K}{F} = 1 - p \tag{4-33}$$

b). Probability of Error

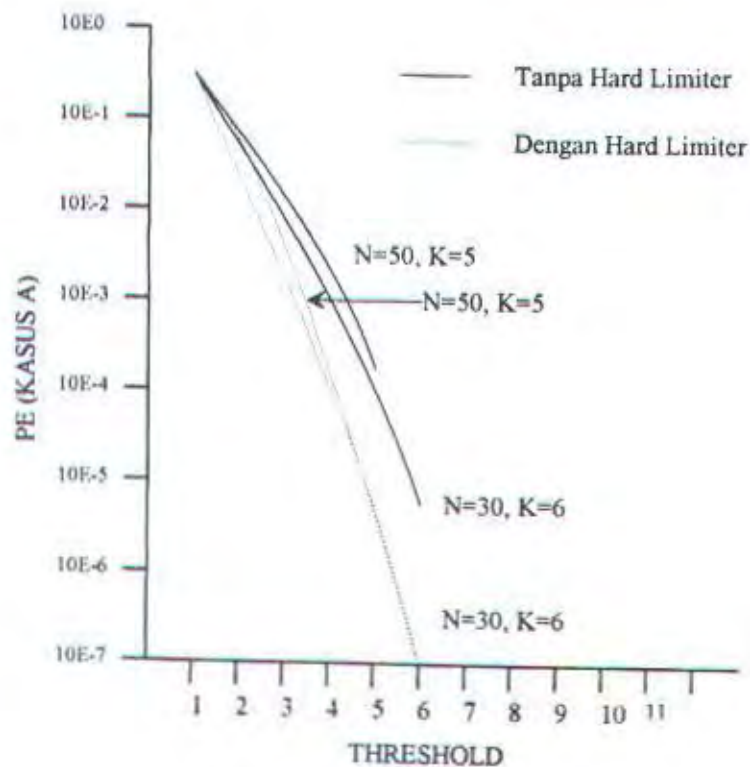
Pada bagian ini akan diturunkan batas atas (upper bound) dan batas bawah (lower bound) dari PE sebagai gantinya menghitung persamaan eksak untuk itu. Penurunan persamaan eksak untuk kasus A dan kasus B dengan penambahan perangkat hard limiter secara matematis sangatlah kompleks karena tingginya korelasi kejadian $V_j^{(n)}$ untuk semua $1 \leq n \leq N-1$ dan $0 \leq j \leq F-1$. Untuk menghindari kompleksitas persamaan matematis maka untuk kedua kasus akan diturunkan persamaan untuk PE batas atas (upperbound) saja.

Pada *chip synchronous* (kasus A), error akan terjadi bila transmitter yang diinginkan mengirimkan pulsa nol dan sinyal interferen, akibat adanya sinyal dari user yang lain, mereproduksi pola yang diinginkan melebihi level *threshold* atau lebih tinggi levelnya dari level sinyal pada bagian akhir *fiber optic tapped delay line* yang dituju. Terdapat $\binom{K}{Th}$ kombinasi cara untuk reproduksi pola dengan K pulsa melebihi level *threshold* Th . Batas atas (upperbound) dapat diperoleh dengan mengasumsikan posisi khusus sebuah chip dari sekuen yang diharapkan akan ditempati untuk pertama kali dengan probabilitas $p' = 1 - q^{N-1}$. Lalu, posisi chip berikutnya akan ditempati oleh satu sinyal interferen yang kurang efektif. Dengan kata lain, probabilitas dari ditempatinya satu dari $K-1$ chip sisa adalah $1 - q^{N-2}$, dan seterusnya. Sehingga, PE batas atas (upperbound) dengan *optical hard limiter* dapat dituliskan sebagai :

$$PE[\text{kasus A}] \leq \frac{1}{2} \binom{K}{Th} \prod_{m=0}^{Th-1} (1 - q^{N-1-m}) \quad (4-34)$$

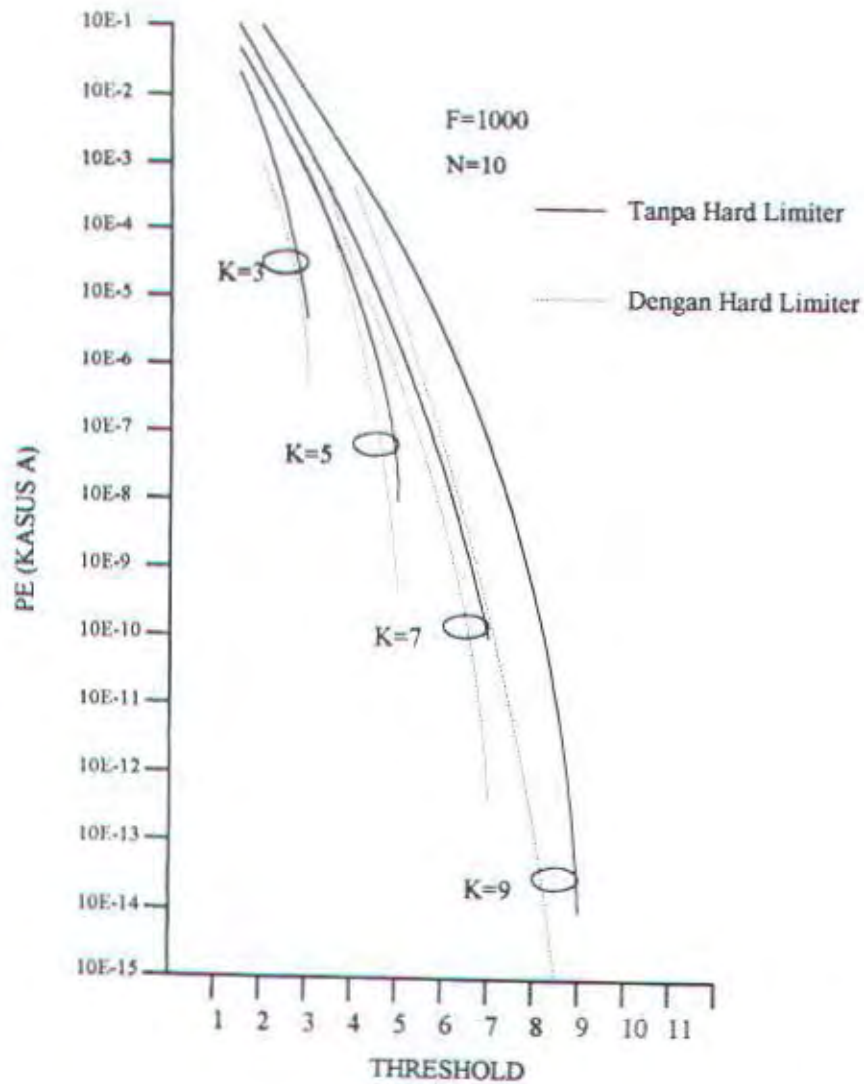
di mana q didefinisikan sama dengan persamaan (4-27). Gambar 4.9 sampai dengan gambar 4.11 menunjukkan performansi sistem *optical CDMA* dengan dan tanpa

perangkat *optical hard limiter* untuk harga N , K , dan F yang berbeda. Gambar 4.9 menunjukkan PE batas atas (upperbound), persamaan (4-34), dengan PE yang tanpa hard limiter, persamaan (4-16), versus *threshold* Th untuk $N=10$, $F=1000$, dan dengan nilai K yang berbeda ($K=1,3,5,7,9$). Untuk $K=1$ dan $Th=1$, performansi



GAMBAR 4.9

BIT ERROR RATE (UPPER BOUND) UNTUK $F=1000$, $N=10$ DAN
 $K=1,3,5,7,9$ DENGAN DAN TANPA MENGGUNAKAN HARD LIMITER

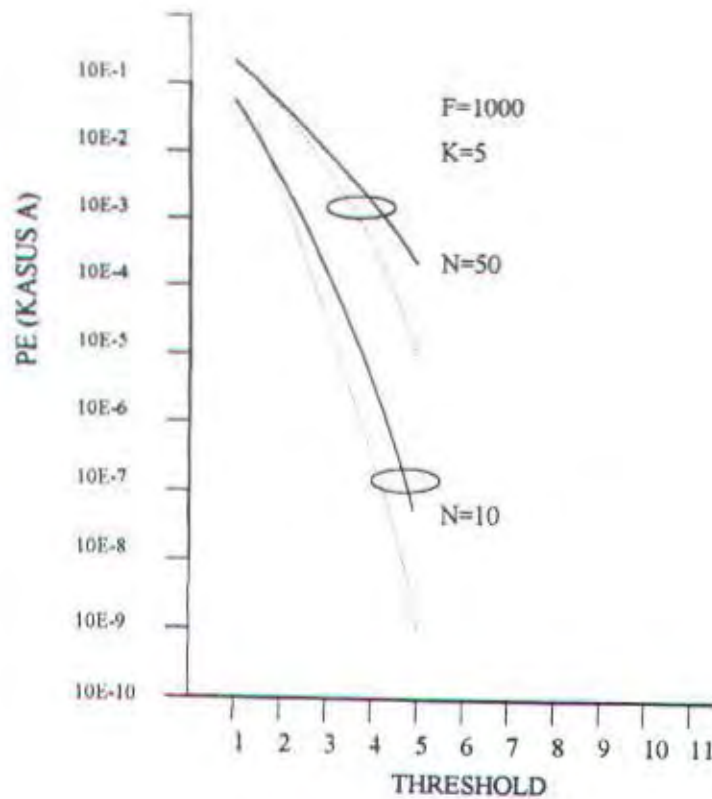


GAMBAR 4.10

BIT ERROR RATE (UPPER BOUND) VERSUS THRESHOLD

UNTUK $N=50$, $K=5$, $N=30$, $K=6$ DAN $F=1000$,

DENGAN DAN TANPA MENGGUNAKAN HARD LIMITER



GAMBAR 4.11

BIT ERROR RATE (UPPER BOUND) VERSUS THRESHOLD

UNTUK $F=1000$, $K=5$, DAN $N=10,50$

DENGAN DAN TANPA MENGGUNAKAN HARD LIMITER

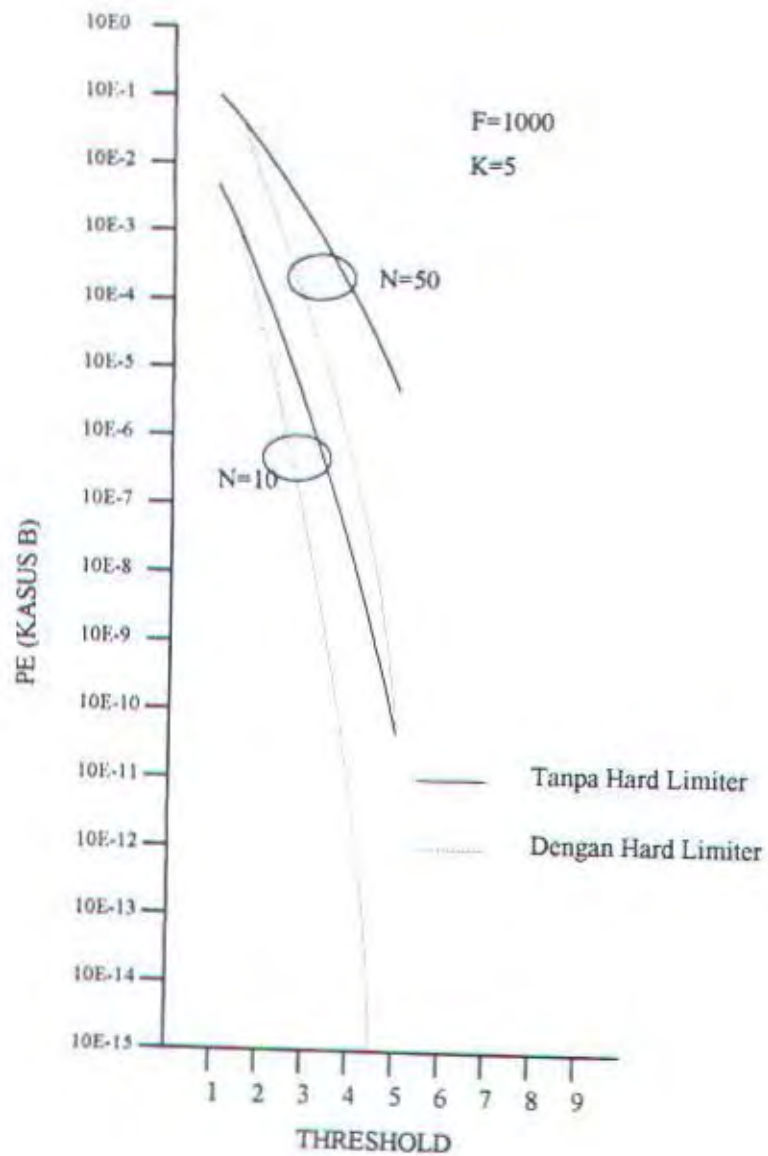
kedua sistem (dengan dan tanpa hard limiter) menunjukkan angka yang sama sekitar 2.24×10^{-3} . Hasil ini merupakan hasil yang diharapkan karena bila Th diset "1" pada sistem dengan hard limiter, error akibat penjumlahan analog intensitas cahaya masih memberikan kontribusi pada *error rate* secara keseluruhan. Kenyataannya, hal ini memang sesuai untuk semua sistem *optical* CDMA dengan

nilai N , F , dan K yang berbeda. Namun, bila level T_h ditingkatkan, *optical* CDMA dengan hard limiter lebih baik performansinya bila dibandingkan dengan yang tanpa hard limiter. Dengan begitu sistem yang memanfaatkan *optical hard limiter* performansinya lebih superior bila dibandingkan dengan sistem tanpa *optical hard limiter*.

Untuk kasus *ideal chip asynchronous* (kasus B), seperti pada kasus A, PE batas atas (upperbound) dengan *optical hard limiter* dapat ditulis sebagai :

$$PE[\text{kasus B}] \leq \frac{1}{2} \binom{K}{T_h} \prod_{m=0}^{T_h-1} (1 - [q^{N-1-m} + (N-1-m)pq^{N-2-m} + \sum_{i=2}^{N-1-m} \binom{N-1-m}{i} p^i q^{N-1-i-m} (1 - Q(\frac{1-i/2}{\sqrt{v/12}}))]) \quad (4-35)$$

di mana p dan q didefinisikan sebagaimana pada persamaan (4-33). Gambar 4.12 menunjukkan PE *upperbound*, persamaan (4-35), versus T_h untuk $F=1000$, $K=5$, dan nilai N yang berbeda ($N=10,50$). Lebih jauh lagi, pada gambar 4.12 dibandingkan persamaan (4-35) dengan performansi sistem *optical* CDMA yang memiliki penerima jenis *tapped delay line*. Performansi sistem dengan *optical hard-limiting* (garis putus-putus) empat sampai lima kali lebih baik daripada sistem CDMA tanpa *optical hard-limiting*. Untuk *bit error rate* mendekati 10^{-10} , sistem *optical* CDMA tanpa *optical hard-limiter* hanya dapat mengakomodasikan 10 user, sedangkan sistem *optical* CDMA dengan *optical hard-limiter* dapat menampung sampai 50 user.



GAMBAR 4.12

BIT ERROR RATE VERSUS THRESHOLD (LOWER BOUND)

UNTUK $F=1000$, $K=5$, $N=10, 50$

DENGAN DAN TANPA MENGGUNAKAN HARD LIMITER

IV. 4. Random Carrier CDMA (RC CDMA) ³⁴

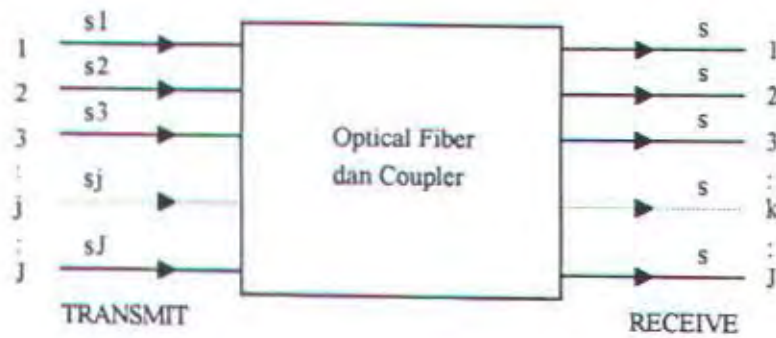
Pada sistem radio yang memanfaatkan teknik multipleks CDMA, lebar bidang (bandwidth) suatu sinyal disebarkan untuk menduduki lebar bidang sistem yang tersedia. Sebaliknya, pada RC CDMA setiap sinyal dengan gelombang pembawa yang berbeda disebarkan (spreading) hingga menduduki lebar bidangnya saja, kemudian *spread bandwidth* ini baru dilewatkan pada media serat optik. Karena media transmisi serat optik memiliki *bandwidth* yang begitu lebar maka jumlah *spread bandwidth* yang dapat dilewatkan akan semakin banyak pula. Penempatan *spread bandwidth* ini dapat dilakukan secara acak (random) tanpa membutuhkan kordinasi jaringan, sehingga teknik multipleks ini dinamakan *random-carrier CDMA*.

IV. 4. 1. Prinsip Operasi

Dalam sistem CDMA konvensional, setiap user menggunakan gelombang pembawa (carrier) yang sama. Pada RC CDMA *carrier* disebarkan secara acak pada lebar bidang yang cukup besar. Secara matematis, frekuensi gelombang pembawa, $\{\omega_i = 2\pi f_i\}_{i=1}^J$, diasumsikan independen dan terdistribusi normal pada interval frekuensi optik yang dapat diatur.

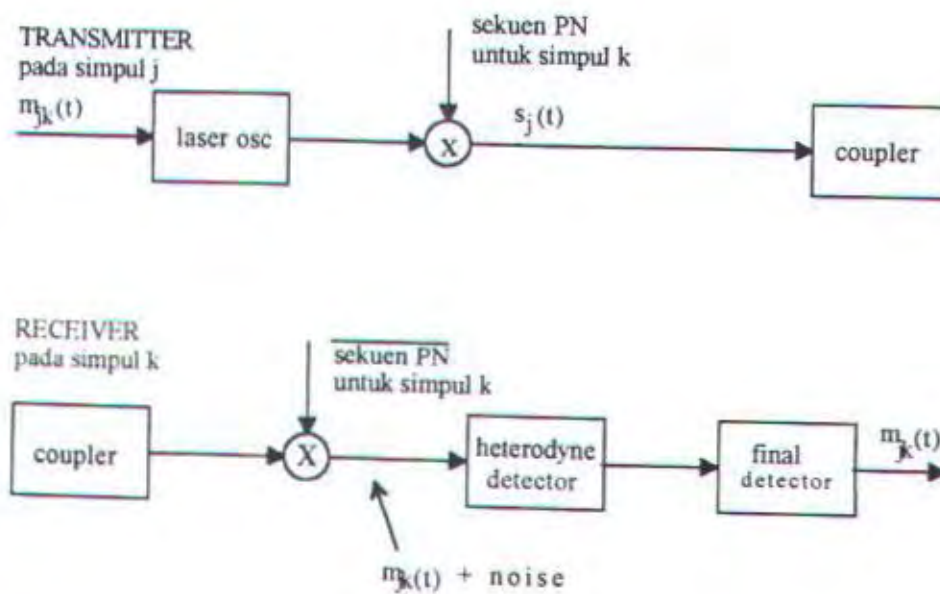
Segi empat pada gambar 4.13, yang mewakili *coupler-fiber arrangement*, hanya berfungsi sebagai penerima dan penggabung sinyal datang saja yang selanjutnya meneruskan sinyal tersebut pada simpul penerimanya masing-masing. Di sisi penerima $s = \sum s_m$.

³⁴ Gerard J. Foschini, Giovanni Vannucci, Using Spread-Spectrum in a High-Capacity Fiber-Optic Local Network, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 6, No. 3, March 1988, hal. 370-379.



GAMBAR 4.13

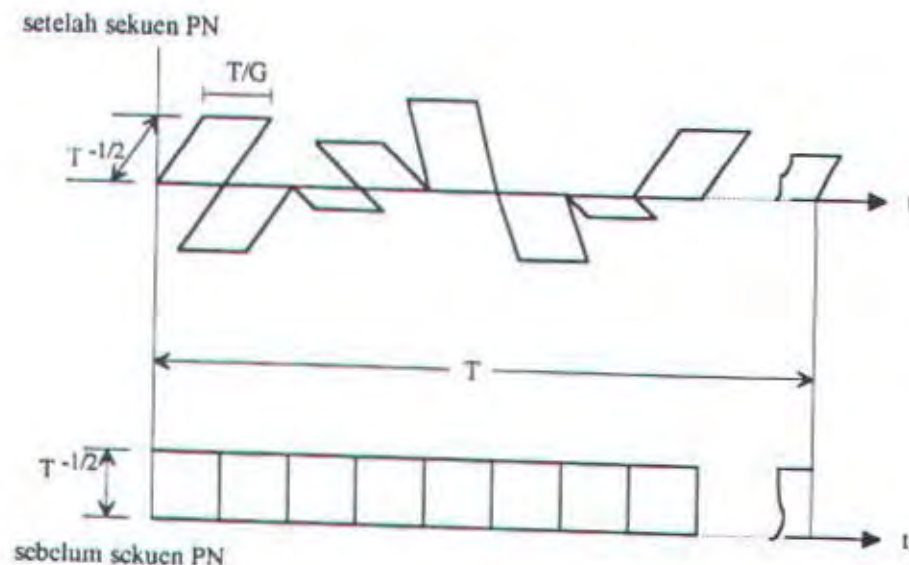
OPTICAL FIBER DAN COUPLER



GAMBAR 4.14

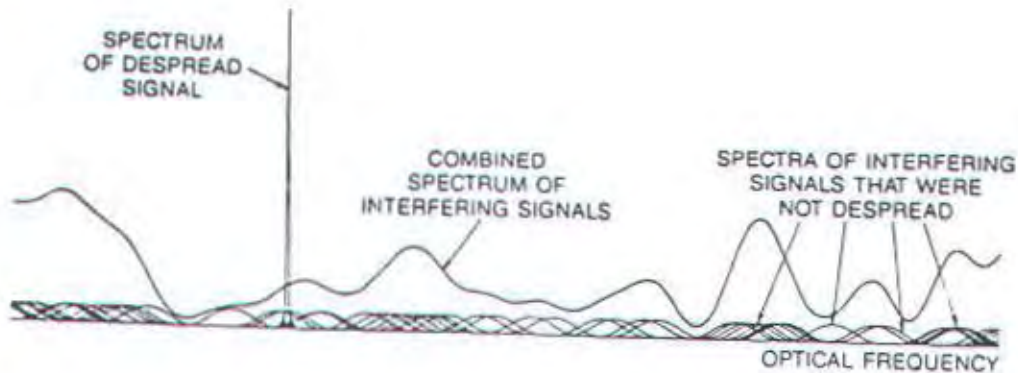
TRANSMISI DARI SIMPUL J KE SIMPUL K

Banyak cara yang telah dikembangkan untuk mendapatkan fungsi ini, seperti *fiber bus* atau *star coupler*. Sinyal-sinyal datang (incident signals) tersebar acak dalam frekuensi yang berlainan. Penyebaran sinyal (spreading) mengikuti bentuk rotasi *pseudorandom* dari fase sinyal modulasi selama interval chip T_c sesuai dengan sekuen bit *pseudorandom* (atau pseudonoise / PN) yang berkaitan dengan penerima yang dituju, seperti pada gambar 4.15. Di sisi penerima terjadi proses *despread* dengan memanfaatkan sekuen PN yang sama, mengurangi kembali dengan fase seperti pada proses *spreading*. Setelah proses *despreading*, seolah-olah sebelumnya sama sekali tidak terjadi *spreading*. Untuk kesempurnaan terjadinya *despreading*, sekuen PN yang dipakai di penerima harus sinkron dengan sekuen



GAMBAR 4.15

SEKUEN PN YANG DIPAKAI PADA UNIT ENERGY PULSE



GAMBAR 4.16

SPEKTRUM SINYAL SAAT TRANSMISI J KE K
SETELAH PROSES DESPREADING

yang dipakai di pemancar (transmitter). Proses *spreading* dan *despreading* ini dapat dikenakan secara langsung pada sinyal optik dengan menggunakan *lithium niobate crystal phase modulator*.

Gambar 4.16 menunjukkan spektrum sinyal di penerima setelah mengalami proses *spreading*. Selama *chip rate* (bit rate dari sekuen PN) masih lebih tinggi bila dibandingkan dengan bit rate dari sinyal modulasi, transmisi sinyal pada penerima yang dituju spektrumnya akan kelihatan seperti "paku" yang di sekitarnya terdapat *low level noise*. *Noise* ini merupakan superposisi dari banyak sinyal interferensi, yang tidak mengalami proses *despread* karena memiliki sekuen PN yang berlainan saat mengalami *spreading*.

IV.4. 2. Penampilan Sistem

Pada bagian ini akan dibahas performansi sistem dari RC CDMA untuk kasus ideal, di mana *bandwidth* laser *Lorentzian* adalah nol. Sebelumnya, akan dibahas lebih dulu beberapa hal menyangkut degradasi performansi sistem yang nantinya dijadikan landasan kasus ideal. Agar lebih mendekati kondisi ideal diasumsikan modulasi digital dengan parameter khusus, meskipun demikian hasil akhir dinyatakan dalam *carrier to noise ratio* dan *spread spectrum processing gain*, yang pada kenyataannya tidak bergantung pada jenis modulasi.

IV. 4. 2. 1. Modulasi dan Spreading

Pada proses transmisi, sinyal-sinyal yang ditransmisikan dan memodulasi laser dianggap sebagai sinyal-sinyal data. Bentuk modulasi yang dipakai adalah *on-off keying* (OOK). Dalam setiap interval waktu yang berurutan, dengan durasi T , sebuah bit ditransmisikan ke setiap kanal J . Untuk memudahkan perhitungan, diasumsikan adanya sinkronisasi bit dan chip pada setiap proses transmisi.

Bila E_b merupakan energi per bit, sinyal termodulasi $u_j(t)$ pada setiap interval $\{(p-1)T \leq t \leq pT\}$ didefinisikan sebagai :

$$\begin{aligned} u_j(t) &\triangleq 2(E_b/T)^{1/2}, & \text{jika bit "1" yang ditransmisikan} \\ u_j(t) &\triangleq 0, & \text{jika bit "0" yang ditransmisikan} \end{aligned} \quad (4-36)$$

Dari normalisasi pada persamaan (4-36), sinyal *passband* memodulasi sinyal sebelum dikenai proses *spreading* memiliki energi rata-rata E_b joule per bit. Karena energi noise juga diperhitungkan secara langsung sebagai E_b , maka dalam kalkulasi performansi tak akan ada pengaruhnya bila E_b dinormalisasi menjadi 1.

$$v_j(t) = u_j(t) \cos \omega_j t \quad (4-37)$$

Urut-urutan data J, sebagaimana bit-bit data dalam tiap urutan, dimodelkan sebagai data yang independen secara statistik. Waktu chip (chip time) T_c diasumsikan sebagai penyebut dari waktu T, seperti ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$G = T/T_c \quad (4-38)$$

di mana G disebut sebagai *spread-spectrum processing gain*. Nilai-nilai G yang menjadi perhatian utama dalam bahasan ini berkisar pada ratusan saja, karena bila $T=10^{-7}$ s, $G=100$ akan diperoleh *chip rate* sekitar 1 Gbit/s.

IV. 4. 2. 2. Carrier Power to Noise Power Ratio (CNR)

Pada bagian ini akan dihitung *carrier power to noise power ratio* di penerima. Sebelumnya didapat *carrier power* yang diterima $E_c/T = T^{-1}$. Bila $N_0/2$ merupakan *noise power spectral density* dan W_0 mendekati *passband bandwidth*, maka noise power totalnya adalah $N_0 W_0$. Karena $W_0 T$ nilainya mendekati 1, maka akan diperoleh :

$$CNR = N_0^{-1} \quad (4-39)$$

Bila \sum_i' menunjukkan penjumlahan infinit ganda terhadap semua sinyal interferensi sehingga stasiun yang dituju, yang diasumsikan memiliki frekuensi *center* pada $\omega_0=0$, tidak diikuti dalam penjumlahan. Untuk sinyal dan penghasil sinyal interferens, setengah dari interval simbol akan diduduki oleh sinyal-sinyal nol.

Carrier to noise ratio dapat dituliskan sebagai berikut :

$$CNR = G / \left(\sum_{i=-\infty}^{\infty} \sin^2(\omega_i T/2G) / (\omega_i T/2G)^2 \right) \quad (4-40)$$

IV. 4. 2. 3. Chernoff Bound pada Outage Probability

Probabilitas terjadinya *outage* P_o didefinisikan sebagai kemungkinan munculnya P_b melebihi level *threshold* tertentu, seperti dinyatakan pada persamaan berikut :

$$P_o = P\{P_b \text{ berada di atas } threshold\} \quad (4-41)$$

di mana P_b menyatakan probabilitas *bit error* untuk transmisi simpul j ke k . Untuk lebih mudahnya, didefinisikan kembali P_o sebagai probabilitas CNR pada input penerima melebihi level *threshold* tertentu, ρ . *Threshold* ρ diset agar berkaitan dengan P_b sehingga redefinisi P_o tidak menyimpang dari definisi sebelumnya. Dengan demikian, sistem akan mengalami *outage* bila $I \geq G/\rho$. Untuk mendefinisikan batas atas (upper bound) dipakai teknik *Chernoff bounding*. Untuk setiap $s \geq 0$, maka :

$$P_o \triangleq P[I \geq G/\rho] \leq E[\exp[s(I - G/\rho)]] \quad (4-42)$$

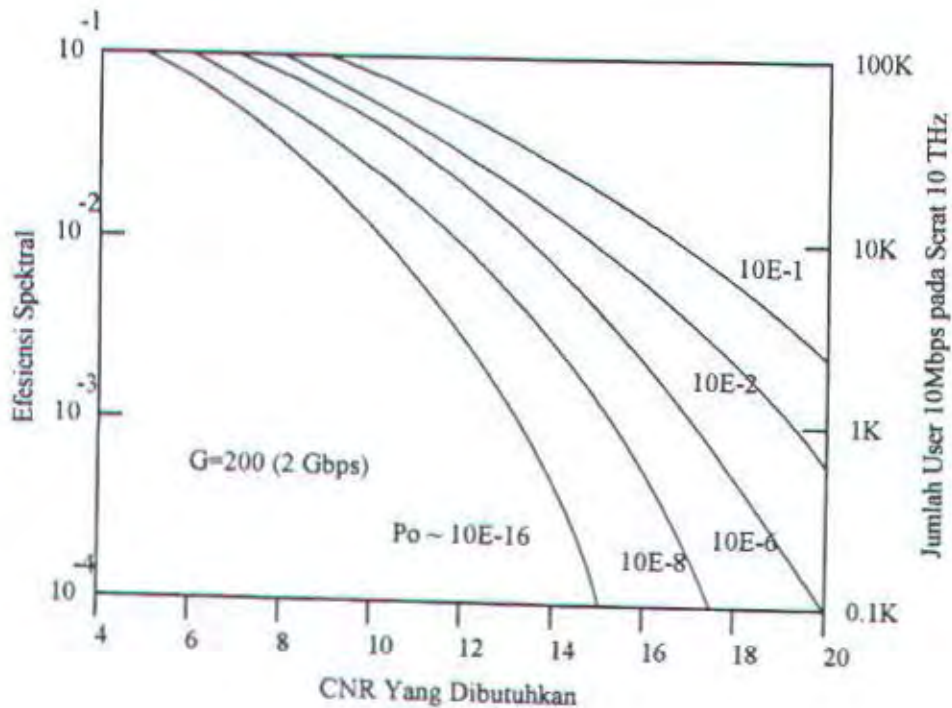
Untuk memperoleh batas yang rapat akan dicari nilai positif dari s yang meminimumkan persamaan $E[\exp[s(I - G/\rho)]]$. Dengan persamaan analitik akan diperoleh :

$$P_o < \exp\left[-G\left\{\int_0^{\infty} \left(1 - e^{s^* \sin^2 \xi / \xi^2}\right) d\xi + s^* \rho^{-1}\right\}\right] \quad (4-43)$$

di mana $\xi \triangleq \omega T/2G$ dan s^* merupakan nilai ekstrem untuk s . Dari persamaan di atas didapat bahwa batas *Chernoff* untuk P_o merupakan eksponensial dari *processing gain*. Dengan begitu, P_o akan berkurang secara substansial bila kecepatan proses dari *hardware* bisa lebih ditingkatkan.

Gambar 4.17 menunjukkan hubungan antara efisiensi spektral, CNR yang dibutuhkan, *outage probability*, serta jumlah *user* yang dapat ditampung dalam

serat optik 10 THz dengan kecepatan data 10 Mbps. Dari grafik tersebut terlihat bahwa dengan CNR 10.5 dB, RC CDMA mampu menampung sekitar 17000 stasiun (user) dengan probabilitas kesalahan sekitar 10^{-8} . Sedangkan untuk jumlah stasiun yang lebih besar, di atas 30000 *user*, RC CDMA memberikan probabilitas kesalahan sekitar 10^{-4} . Hasil ini tentu saja sangat menjanjikan bila dapat direalisasikan dalam sistem praktisnya.



GAMBAR 4.17

PROBABILITAS ERROR, JUMLAH USER, EFISIENSI SPEKTRAL
DAN CNR YANG DIBUTUHKAN

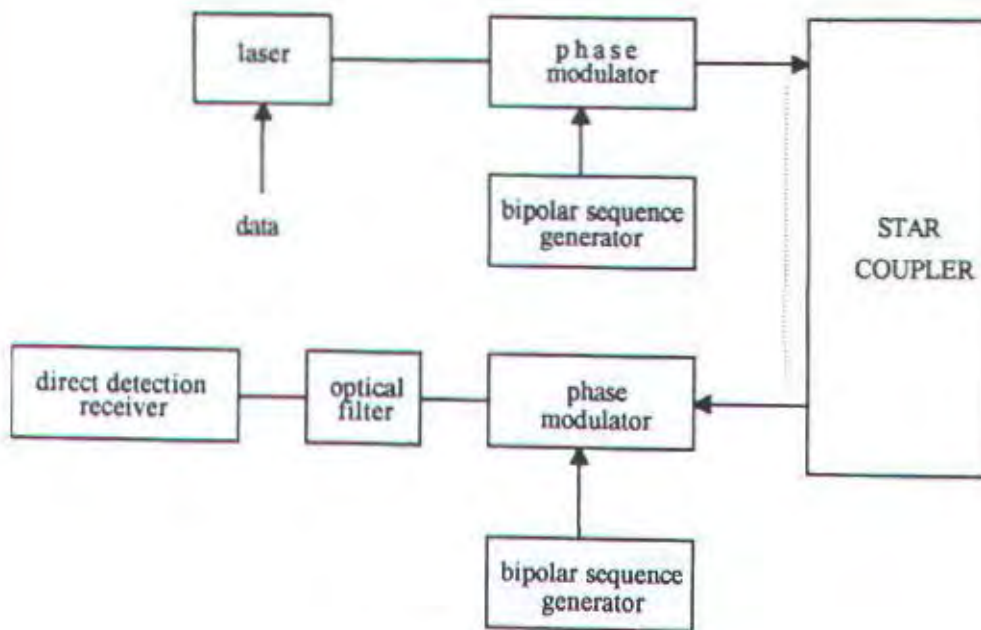
IV. 5. Bipolar Codes CDMA³⁵

Bipolar Codes CDMA merupakan jenis CDMA untuk optik yang memanfaatkan kode-kode bipolar sebagai metode pengkodeannya. Kode-kode bipolar merupakan kode-kode yang memanfaatkan perbedaan tegangan (positif/negatif) untuk mewakili bit "1" dan bit "0". Banyak jenis kode yang termasuk dalam kategori bipolar. Namun yang dipakai dalam *Bipolar Codes CDMA* ini hanya *Gold codes* saja.

IV. 5. 1. Prinsip Operasi

Blok diagram dari satu pasangan pemancar-penerima pada *Bipolar Codes CDMA* ditunjukkan pada gambar 4.18. Bila dipakai pada konfigurasi bintang (star configuration), setiap user bebas mengakses ke jaringan secara asinkronus melalui K+1 dan K+1 *Star Coupler*, di mana K+1 merupakan jumlah pelanggan (subscriber). Setiap pemancar terdiri dari satu laser yang dimodulasi langsung oleh sekuen informasi, yang menghasilkan sinyal termodulasi sinyal ASK. Pada bagian *Modulator electrooptic* dipakai untuk memodulasi fase dari setiap sinyal dengan sinyal *pseudorandom*. Karena kecepatan perangkat elektronik yang dipakai untuk membangkitkan sekeun-sekuen informasi terbatas hanya sekitar 10 Gchp/s, maka *spreading gain* yang dihasilkan hanya berkisar antara 100 dan 250, untuk *bit rate* antara 100 sampai 40 Mbt/s. Hal ini sangat mencukupi untuk aplikasi pada *local area network*. Meskipun demikian, dengan teknik yang lain dapat digunakan

³⁵ D. Zaccarin, M. Kavehrad, *Performance Evaluation of Optical CDMA Systems Using Non-Coherent Detection and Bipolar Codes*, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 12, No. 1, January 1994, hal. 96-105.



GAMBAR 4.18

MODEL UNTUK SISTEM BIPOLAR CDMA

untuk meningkatkan *chip rate* tanpa harus menurunkan *bit rate*. Cara yang paling sederhana mungkin dapat dilakukan dengan mengkaskadekan modulator-modulator fase P, sebagaimana dilakukan untuk mendapatkan gerbang *optical AND*. Dalam kasus ini sekuen-sekuen P, dengan delay yang memadai, dipakai untuk men-*drive* modulator-modulator tadi. Untuk menghindari terlalu banyak *insertion loss*, serangkaian elektroda-elektroda P dapat dipakai sebagai *waveguide* dengan dielektrik tunggal. Bila setiap sekuen memiliki periode N_s dan periode chip T_c , maka sekuen yang dihasilkan setelah melewati semua modulator fase memiliki periode chip sebesar $T_c / P = T_c$. Panjang (length) setiap sekuen

menjadi $N = N_s \times P$, sehingga *bit rate* masih tetap $1/(N_s T_s)$. Sebagai contoh, bila dipakai tiga modulator fase dan modulator elektronik 10 GHz, akan diperoleh panjang kode (code length) $N = 3 \times 85 = 255$ untuk *bit rate* $10^{10}/85 = 117.6$ Mbt/s. Selanjutnya setiap sinyal dipancarkan ke setiap user melalui *star coupler* tadi, yang diasumsikan tidak memberikan distorsi pada sinyal. Di setiap penerima, modulator fase yang kedua dipakai untuk men-*despread* sinyal yang datang dari pasangan pemancarnya. Untuk mendapatkan hasil *despreading* yang sempurna, sinkronisasi waktu antara pasangan pemancar-penerima sangat dibutuhkan.

Sampai di titik ini, user-user interferensi (bukan pasangannya) mengalami proses *spreading* frekuensi karena modulasi fase sekuen-sekuen. Karena itu, penggunaan *optical filter* sangat penting untuk menolak sinyal-sinyal interferensi (bukan informasi). Tanpa filter ini, ditambah lagi karena memakai sekuen-sekuen bipolar, semua sinyal interferensi tadi seolah-olah mengalami proses *despreading* pada output *photodetector* sehingga membuat proses deteksi menjadi mustahil.

Pada salah satu output *star coupler*, sinyal yang diterima dapat ditulis sebagai :

$$\vec{E}(t) = \sum_{k=0}^K \sqrt{2P} I^k(t - \tau_k) a_k(t - \tau_k) \times \cos(2\pi f_c t + \phi_k) \quad (4-44)$$

di mana $I^k(t)$ merupakan modulasi data, $a_k(t)$ adalah *spreading waveform* dari user k , τ_k merupakan delay untuk transmisi asinkronus antaruser dan $\phi_k = \theta_k - 2\pi f_c \tau_k$ merupakan fase total untuk user ke- k , di mana θ_k fase random awal. Untuk asinkronisasi yang sempurna, τ_k terdistribusi secara acak antara $[0, T]$. Modulasi data $I^k(t)$ dapat ditulis dalam bentuk :

$$I^k(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} I_i^k(t - iT) \quad (4-45)$$

di mana I_i merupakan bit "1" atau "0", T adalah simbol untuk durasi dan $s(t)=1$ untuk $0 \leq t \leq T$. Dengan begitu, diasumsikan tak ada power yang ditransmisikan bila bit yang dikirim adalah "0". Sedangkan *spreading waveform* dapat ditulis :

$$a_k(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} a_j^k p(t - jT_c) \quad (4-46)$$

di mana a_j^k merupakan sekuen *pseudorandom* periodik dengan periode N dan memiliki elemen dari himpunan $[-1, 1]$. Bila $T = NT_c$, dengan T_c adalah waktu/durasi chip, dan $p(t) = 1$ untuk $0 \leq t \leq T_c$, maka akan didapat bentuk gelombang chip yang segiempat atau *rectangular*.

Tanpa kehilangan kesan general, diasumsikan penerima untuk user $k=0$. *Electroptic phase modulator* yang kedua dipakai untuk proses *despread* sinyal yang diinginkan. Dengan begitu, sinyal yang diterima secara keseluruhan dimodulasi fase oleh $a_0(t)$. Diasumsikan juga sinkronisasi kode antara pemancar-penerima telah sempurna, maka pada output modulator akan diperoleh :

$$\begin{aligned} \vec{E}_T(t) = & \sqrt{2P} I^0(t) \cos(2\pi f_c t + \phi_0) + \sum_{k=1}^K \sqrt{2P} I^k(t - \tau_k) a_0(t) a_k(t - \tau_k) \\ & \times \cos(2\pi f_c t + \phi_k) \end{aligned} \quad (4-47)$$

Suku pertama dari persamaan (4-47) merupakan sinyal yang diinginkan dan suku keduanya mewakili sinyal interferensi yang datang dari user-user yang lain.

A. Output dari Optical Filter.

Optical filter yang digunakan adalah *matched filter* untuk bentuk sinyal $I^0(t)$ dengan respon impuls :

$$h(t) = \frac{2}{T} \cos(2\pi f_c t) \quad \text{untuk } 0 \leq t \leq T \quad (4-48)$$

Complex envelope dari sinyal yang diinginkan pada output filter dan waktu $t = T$ adalah :

$$X_0(t) = \sqrt{P} b_0 e^{j\phi_0} \quad (4-49)$$

di mana b_0 merupakan bit "1" atau "0" tergantung dari simbol yang ditransmisikan.

Untuk sinyal interferensi akan diperoleh :

$$X_k(T) = e^{j\phi_k} \frac{\sqrt{P}}{N} \left(I_{-1}^k \frac{R_k(\tau_k)}{T_c} + I_0^k \frac{\hat{R}_k(\tau_k)}{T_c} \right) \quad (4-50)$$

di mana $R_k(\tau_k)$ dan $\hat{R}_k(\tau_k)$ merupakan fungsi korelasi silang *continuous-time partial* (*continuous-time partial crosscorrelation function*) yang didefinisikan sebagai :

$$\begin{aligned} R_k(\tau_k) &= \int_0^{\tau_k} a_0(t) a_k(t - \tau_k) dt \quad \text{untuk } 0 \leq t \leq T \\ \hat{R}_k(\tau_k) &= \int_0^T a_0(t) a_k(t - \tau_k) dt \quad \text{untuk } 0 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (4-51)$$

dan $[I_{-1}^k, I_0^k]$ adalah pasangan simbol yang dikirim oleh user k dalam selang waktu $[0, T]$.

B. Output dari Photodetector.

Pada output *photodetector* akan diperoleh variabel berikut :

$$z(T) = R \left| \sqrt{P} b_0 e^{j\phi_0} + \sum_{k=1}^K X_k(T) \right| \quad (4-52)$$

Untuk menghitung *probability of error* dari sistem, terlebih dahulu harus didapat probabilitas dari $z(T) \leq \text{thr}$ atau $z(T) \geq \text{thr}$ untuk $b_0 = 1$ dan $b_0 = 0$, di mana thr merupakan *threshold*. Pada persamaan sebelumnya diketahui bahwa $z(T)$, untuk nilai yang diberikan dari simbol b_0 yang dikirim, merupakan fungsi dari simbol-simbol data $I = (I^1, I^2, \dots, I^K)$, dengan delay $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_K)$ dan sudut fase

$\phi = (\phi^0, \phi^1, \phi^2, \dots, \phi^K)$. Simbol I^K mewakili pasangan simbol yang ditransmisikan $[I_j^K, I_o^K]$ oleh user K dalam selang $[0, T]$. Untuk memudahkan perhitungan, diasumsikan juga setiap delay $\tau_k = l_k T_c$, dengan l_k merupakan integer, sebagai ganti dari delay yang terdistribusi sama pada selang $[0, T]$. Dengan begitu, delay tadi menjadi variabel diskrit acak dengan probabilitas yang sama dan berkisar pada $\{0, T_c, 2T_c, \dots, (N-1)T_c\}$. Hal ini sama saja dengan mengasumsikan bahwa user-user yang ada dalam sistem bersifat *chip synchronous*. Selanjutnya, persamaan (4-51) akan menjadi :

$$\begin{aligned} R_k(\tau_k) &= C_{k,0}(l_k - N)T_c \\ \hat{R}_k(\tau_k) &= C_{k,0}(l_k)T_c \end{aligned} \quad (4-53)$$

di mana $C_{k,0}(n)$ merupakan korelasi silang variabel diskrit apriodik, yaitu :

$$\begin{aligned} C_{k,0}(n) &= \sum_{j=0}^{N-1-n} a_j^k a_{j+n}^0 & 0 \leq n \leq N-1 \\ &= \sum_{j=0}^{N-1+n} a_{j-n}^k a_j^0 & -(N-1) \leq n \leq 0 \\ &= 0 & \text{untuk yang lain} \end{aligned} \quad (4-54)$$

IV. 5. 2. Penampilan Sistem

Untuk menentukan penampilan sistem dari *bipolar code* CDMA ini, sebagaimana teknik *optical* CDMA yang lain, terlebih dahulu ditentukan dulu *probability density function* (pdf) dan selanjutnya baru didapat *probability of error* (probabilitas kesalahan) dari sistem.

IV. 5. 2. 1. Probability Density Function

Untuk memudahkan perhitungan *probability of error* dari $z(T)$ pada persamaan (4-50), setiap bilangan kompleks $X_k(T)$ dinyatakan dalam modulus dan fasenya : $X_k(T) = A_k e^{j\phi_k}$, di mana ϕ_k uniform pada selang $[0, 2\pi]$. Kini persamaan tersebut dapat ditulis dalam :

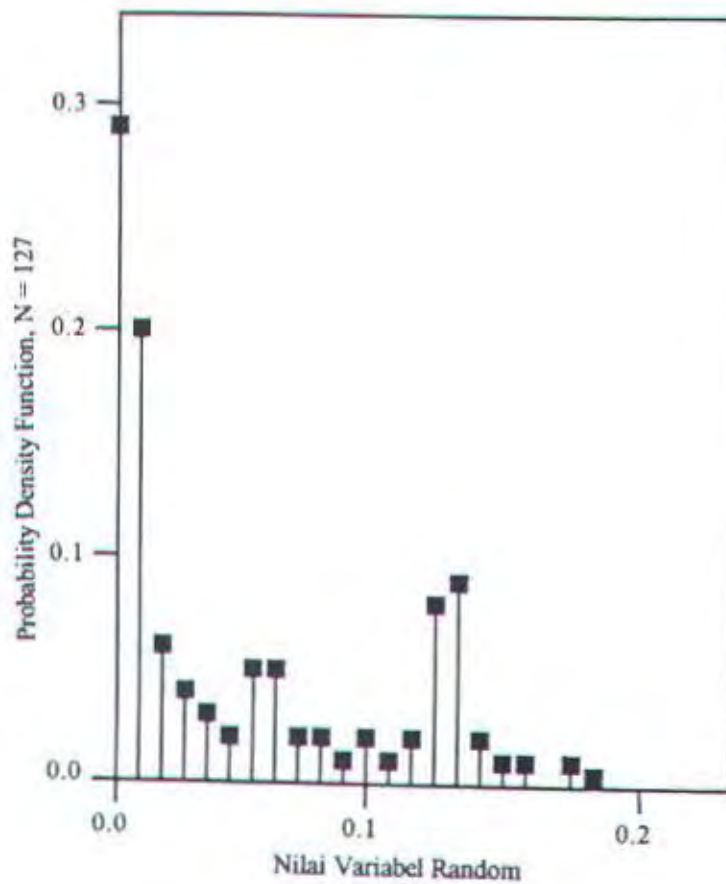
$$z = \left| b_0 e^{j\phi_0} + \sum_{k=1}^K A_k e^{j\phi_k} \right| \quad (4-55)$$

Hal ini akan sangat membantu dalam perhitungan PE. Sebelumnya akan ditentukan dulu *probability density function* (pdf) dari A_k , amplitudo dari sinyal-sinyal interferensi.

Dari persamaan (4-50) didapat bahwa nilai-nilai untuk A_k memiliki jumlah tertentu bila delay $\tau_k = l_k T_c$ bervariasi dari $l_k = 0$ sampai $N-1$. Jumlah maksimum nilai yang didapat pada setiap A_k adalah $3N+1$ karena untuk $I_{-1}^K = I_0^K = 0$, $A_k = 0$ untuk semua nilai τ_k . Namun diharapkan jumlah tersebut pada kenyataannya bisa lebih kecil karena terbatasnya nilai-nilai korelasi silang (crosscorrelation) yang didapat untuk sekuen-sekuen *pseudorandom*. Selanjutnya, karena fase ϕ_k maka dirasa cukup untuk mendapatkan nilai-nilai modulus $|A_k|$ saja. Untuk penyederhanaan notasi, untuk seterusnya modulus $|A_k|$ ditulis A_k saja. Untuk sekuen-sekuen Gold dengan periode $N = 127$ didapat setiap A_k akan memperoleh 22 sampai 24 nilai yang berbeda tergantung pada sekuen eksak yang dipakai.

Dengan memvariasikan nilai l_k dari 0 hingga $N-1$, dapat dibuat program sederhana yang menghitung jumlah kejadian nilai-nilai A_k yang berbeda, dan selanjutnya dapat dihitung pula pdf buat masing-masing A_k . Gambar 4.19

menunjukkan pdf untuk sekuen Gold dengan $N = 127$. Juga dapat dilihat untuk modulasi ASK dan $A_k = 0$ didapat probabilitas ≥ 0.25 karena probabilitas *interfering user* mentransmisikan dua "0" secara berurutan adalah 0.25, untuk

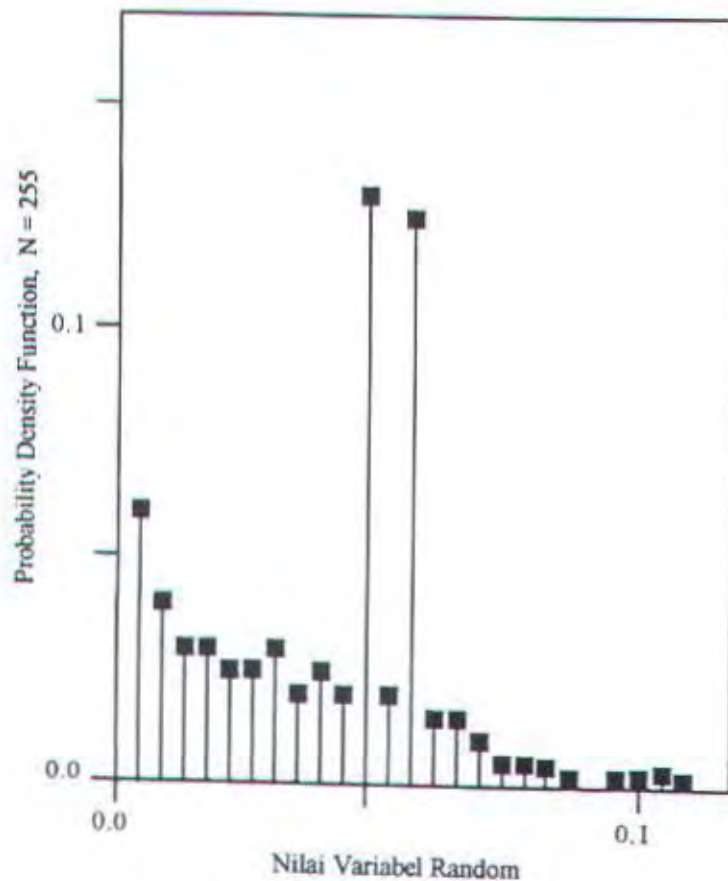


GAMBAR 4.19

PROBABILITY DENSITY FUNCTION

UNTUK SATU INTERFERING USER DAN CODE LENGTH $N = 127$

simbol-simbol yang dipancarkan sama. Sedangkan gambar 4.20 menunjukkan pdf untuk sekuen Kasami dengan periode $N = 225$. Dari gambar-gambar tersebut terlihat, penambahan *code length* akan menurunkan nilai maksimum yang mungkin didapat A_k .



GAMBAR 4.20

PROBABILITY DENSITY FUNCTION

UNTUK SATU INTERFERING USER DAN CODE LENGTH $N = 255$

IV. 5. 2. 2. Probability of Error

Untuk menentukan *probability of error* dapat dipakai dua teknik yang berbeda dengan rentang K (jumlah dari *interfering user*) yang berbeda pula. Bila K kecil, misalnya $K < 5$, dapat digunakan teknik *series expansion* (perluasan deret). Sedangkan untuk $K \geq 5$ digunakan metode integrasi numerik (numerical integration).

A. Metode *Series Expansion* (Perluasan Deret).

Bila bit $b_0 = 0$ yang dikirim dalam suatu transmisi, maka terlebih dahulu ditentukan probabilitas $\Pr(z > \text{thr})$. Untuk seterusnya, notasi z menunjukkan modulusnya, dan thr mewakili akar pangkat dua (square root) dari *threshold* sistem yang sebenarnya. Selanjutnya, huruf-huruf kapital mewakili variabel-variabel random sedangkan huruf-huruf kecil merupakan keluaran partikular dari variabel random. Sebagai contoh, A_i adalah amplitudo acak dari vektor yang berkenaan dengan user i , sedangkan a_i merupakan nilai sebenarnya dari variabel acak tersebut. Berawal dengan fungsi karakteristik dari $\sum A_k e^{j\phi_k}$, dapat ditunjukkan bahwa :

$$\begin{aligned} \Phi_K / \{A_1, A_2, \dots, A_K, b_0 = 0\} &= \Pr(z \geq \text{thr}) \\ &= 1 - \text{thr} \int_0^\infty J_1(\text{thr} \cdot u) \times E_x(u) du \end{aligned} \quad (4-56)$$

di mana

$$E_x(u) = J_0(a_1 u) J_0(a_2 u) \dots J_0(a_K u) \quad (4-57)$$

dan $J_0(x)$, $J_1(x)$ adalah fungsi Bessel berorde 0 dan berorde 1. Perluasan deret diberikan oleh persamaan :

$$\Phi_K / \{A_1, A_2, \dots, A_K, b_0 = 0\} = \frac{2}{S} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{b_m c_m J_0(\text{thr} \cdot j_m / S)}{j_m J_1^2(j_m)} \quad (4-58)$$

di mana

$$S = \sum_{k=1}^K a_k, \quad b_m = \prod_{m=1}^K J_0(a_k j_m / S) \text{ dan } c_m = \sum_{m=1}^K \frac{a_k J_1(a_k j_m / S)}{J_0(a_k j_m / S)}$$

Dari persamaan-persamaan di atas, untuk bit transmisi 0 didapat :

$$Pe/b_{0=0} = \sum_{a_1} \sum_{a_2} \dots \sum_{a_K} p_{a_1} p_{a_2} \dots p_{a_K} \Phi_K / \{A_1, A_2, \dots, A_K, b_0 = 0\} \quad (4-59)$$

sedangkan untuk bit transmisi 1, diperoleh :

$$Pe/b_{0=1} = 1 - \sum_{a_1} \sum_{a_2} \dots \sum_{a_K} p_{a_1} p_{a_2} \dots p_{a_K} \Phi_K / \{A_1, A_2, \dots, A_K, b_0 = 1\} \quad (4-60)$$

di mana $p_{a_i} = \Pr(A_i = a_i)$.

Selanjutnya, *probability of error* sistem, PE, ditentukan oleh persamaan :

$$\frac{1}{2}(Pe/b_{0=0} + Pe/b_{0=1}) \quad (4-61)$$

B. Metode Integrasi Numerik.

Mengacu pada persamaan-persamaan sebelumnya, untuk transmisi bit "0", terlebih dahulu harus dihitung PE berikut :

$$\Phi_K / \{A_1, A_2, \dots, A_K, b_0 = 0\} = 1 - \text{thr} \int_0^\infty J_1(\text{thr} \cdot u) \times \prod_k J_0(a_k u) du \quad (4-62)$$

dan untuk transmisi bit "1" :

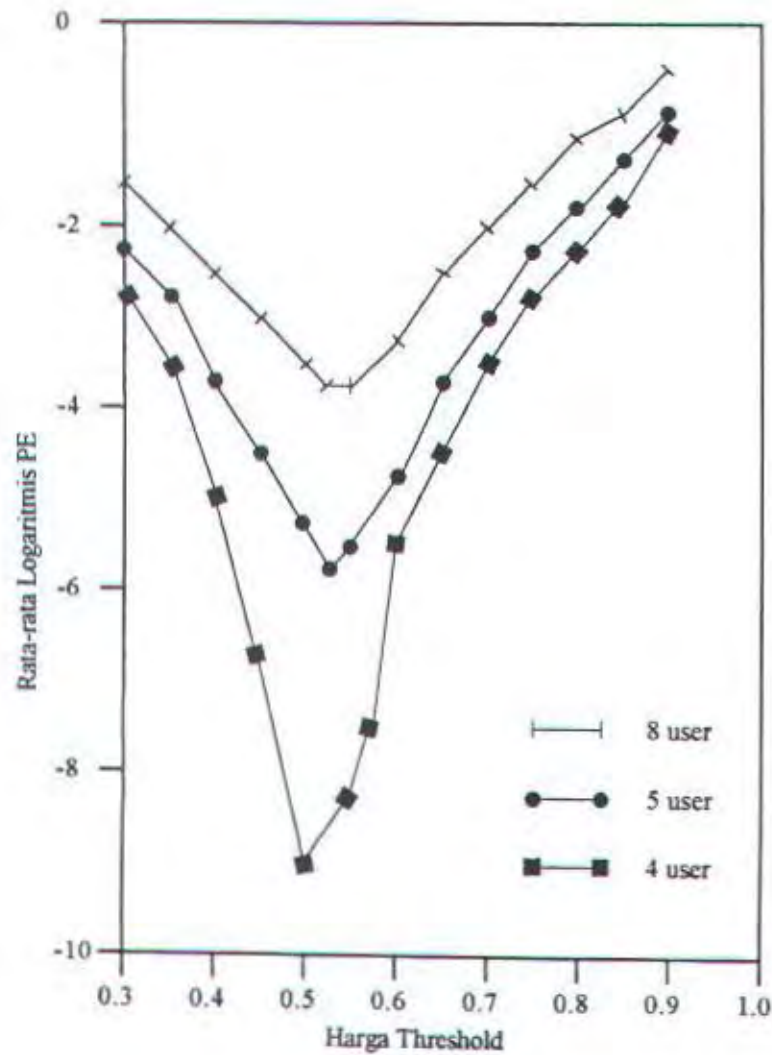
$$\Phi_K / \{A_1, A_2, \dots, A_K, b_0 = 1\} = \text{thr} \int_0^\infty J_1(\text{thr} \cdot u) J_0(u) \times \prod_k J_0(a_k u) du \quad (4-63)$$

Selanjutnya dengan memanfaatkan integrasi numerik akan diperoleh *probability of error* :

$$Pe/b_{0=0} = 1 - \text{thr} \int_0^\infty J_1(\text{thr} \cdot u) \left[\sum_{a_1} p_{a_1} J_0(a_1 u) \right] \cdot \left[\sum_{a_2} p_{a_2} J_0(a_2 u) \right] \cdot \left[\sum_{a_K} p_{a_K} J_0(a_K u) \right] du \quad (4-64)$$

Untuk transmisi bit "1" akan diperoleh tipe persamaan yang sama. Pada persamaan (4-64) terlihat bahwa *interfering users* muncul sebagai hasil perkalian dalam jumlah yang dikenai integral. Untuk setiap harga variabel integrasi u , jumlah (sum) dihitung untuk setiap *interfering user* sesuai dengan harga-harga a_k yang dimunculkan vektor A_k . Perkalian dari semua jumlah (sum) tersebutlah yang dipakai untuk menentukan harga PE.

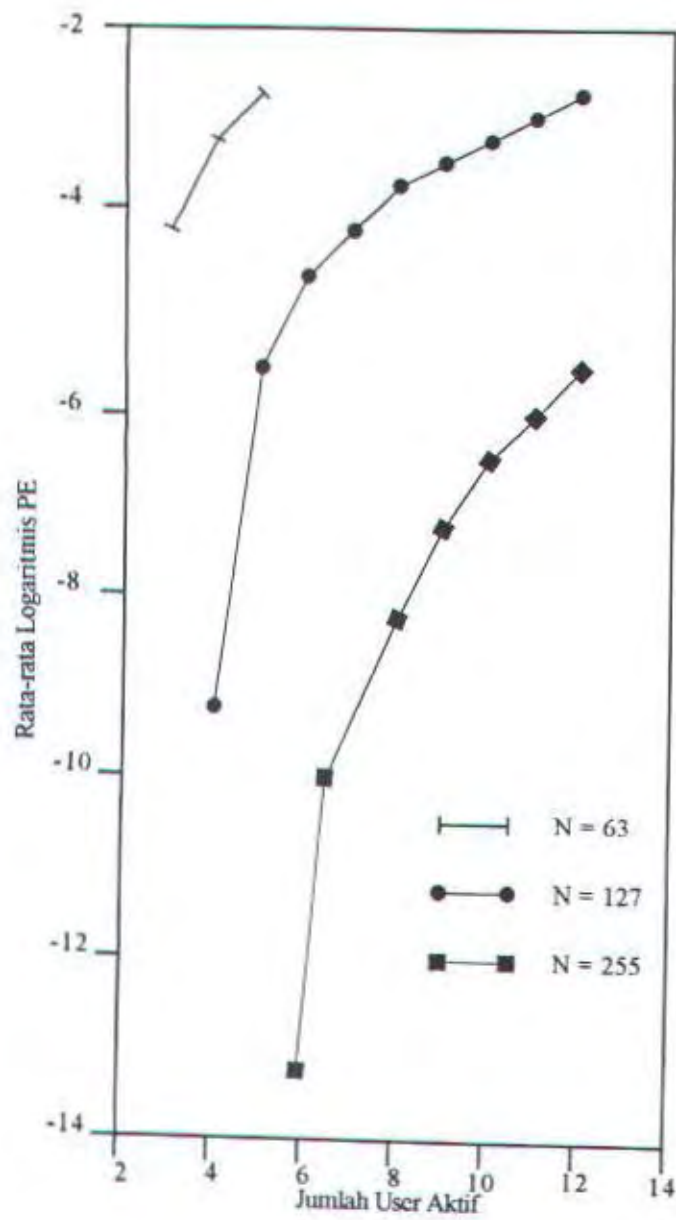
Gambar 4.21 menunjukkan hubungan *probability of error* sebagai fungsi dari nilai *threshold*. Sedangkan pada gambar 4.22 menunjukkan grafik dari *probability of error* sebagai fungsi dari jumlah user aktif dengan *code length* yang



GAMBAR 4.21

PROBABILITY OF ERROR VERSUS THRESHOLD

DENGAN CODE LENGTH $N = 127$



GAMBAR 4.22

PROBABILITY OF ERROR VERSUS JUMLAH USER

UNTUK N = 63, 127 DAN 255

berbeda. Untuk $N = 63$ penampilan sistem terlihat tidak memuaskan. Sedangkan untuk $N = 127$ memungkinkan sekitar 5 user melakukan transmisi secara simultan dengan PE sekitar 10^{-6} . Bila $N = 255$, dengan PE yang sama, jumlah user yang dapat melakukan transmisi secara simultan menjadi 11.

IV. 6. Pulse Position Modulation CDMA (PPM CDMA)³⁶

Pulse position modulation CDMA (PPM CDMA) merupakan salah satu jenis *optical* CDMA yang memanfaatkan modulasi posisi pulsa sebagai metode modulasinya. Pengkodean pada PPM CDMA berdasarkan pada sekuen-sekuen pulsa $[0,1]$ atau kode-kode unipolar. PPM CDMA sebagai metode multipleks telah diaplikasikan pada transmisi sinyal video digital. Karena itu, pembahasannya pada bagian ini pun banyak didasari pada aplikasi PPM CDMA tersebut untuk transmisi sinyal video.

IV. 6. 1. Prinsip Operasi

Prinsip dasar *optical* CDMA dalam transmisi sinyal video adalah bagaimana mengkodekan sinyal data TV terkompres (low rate) menjadi sekuen-sekuen pulsa laser yang dapat didistribusikan lewat satu serat optik. Pada multipleks *nonsynchronous*, sekumpulan sinyal-sinyal digital (digital sources) yang masing-masing menghasilkan sekuen-sekuen terkodekan, dapat mentransmisikan pulsa-pulsa optiknya secara bersamaan lewat satu serat optik dalam suatu jaringan.

³⁶ Robert M. Gagliardi, Antonio J. Mendez, Mark R. Dale, Eugene Park, Fiber-Optic Digital Video Multiplexing Using Optical CDMA, Journal of Lightwave Technology, Vol. 11, No. 1, January 1993, hal. 20-25.

Data video didekodekan kembali di penerima yang dituju dengan cara memisahkan sinyal yang diinginkan dari sekumpulan sinyal yang lain, dan mendapatkan kembali data yang identik dengan data pada *transmitter*. Sekuen-sekuen kode yang dipakai untuk *addressing*, sebagaimana telah dibahas pada bab sebelumnya, harus memenuhi sifat *auto-* dan *crosscorrelation* yang baik.

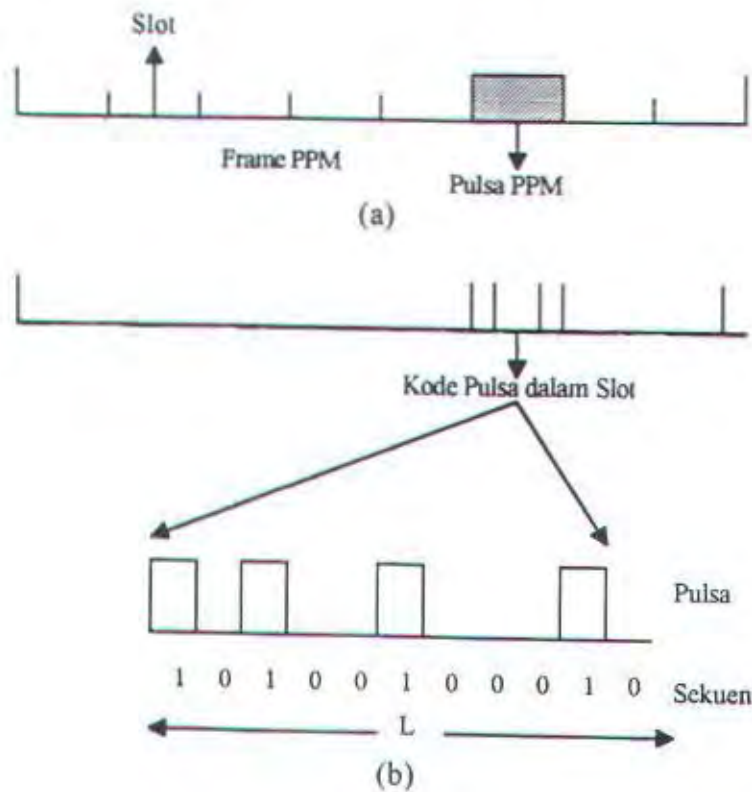
Pada PPM CDMA ini, sekuen kode yang dipakai adalah kode *pseudoorthogonal* (PSO). Sifat penting dari kode ini diberikan oleh persamaan berikut :

$$L = Nw(w - 1)/2 \quad (4-65)$$

di mana L adalah *code length*, N adalah jumlah user, dan w merupakan *weight* (bobot atau jumlah bit "1"). Dari persamaan tersebut didapat bahwa *code length*, untuk w tertentu, memiliki hubungan linear dengan N user (jumlah sekuen PSO).

Untuk mengkodekan sinyal-sinyal data menjadi sekuen-sekuen dapat digunakan format modulasi digital yang telah umum. Pada pembahasan ini dipakai *pulse position modulation*, karena sifatnya yang dapat mengurangi *crosstalk* kanal dan hemat daya (power).

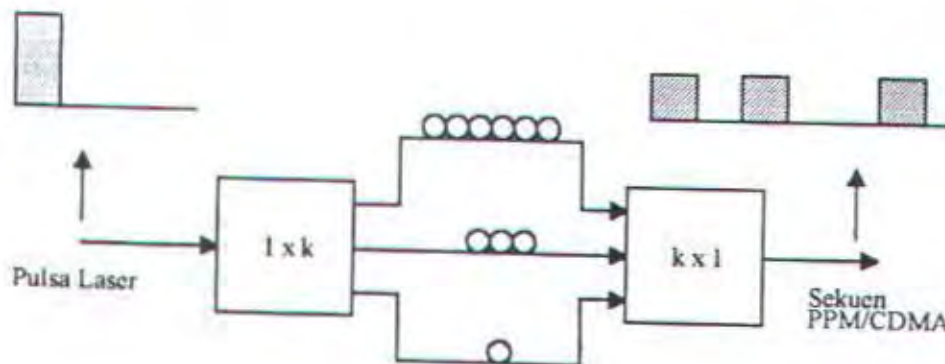
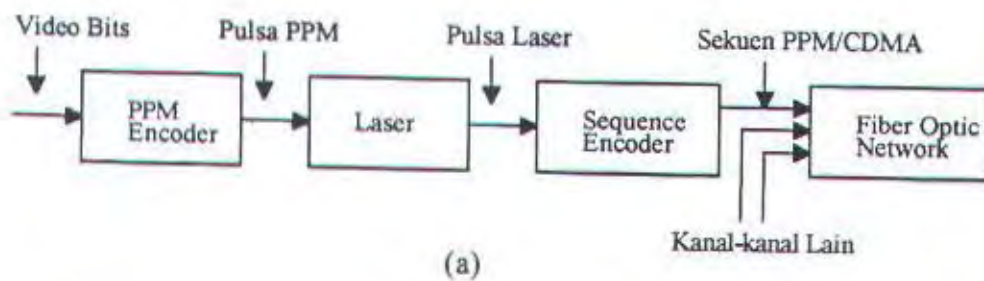
Pada format PPM, aliran bit video yang telah dikompres terlebih dahulu diblok menjadi beberapa *word*. Lalu *word* ini dikodekan menjadi lokasi posisi dalam frame data yang tetap, seperti ditunjukkan pada gambar 4.23(a). Pada PPM CDMA, sekuen kode tertentu dikirim selama satu slot untuk mewakili satu *word*, seperti pada gambar 4.23(b).



GAMBAR 4.23
 FORMAT PPM/CDMA
 (a) FRAME PPM
 (b) SLOT PPM

Video encoder untuk satu kanal ditunjukkan pada gambar 4.24(a). Bit-bit video terkompres diblok menjadi *word-word* dengan *length* $\log M$ bit, dan setiap *word* dikodekan ke dalam salah satu posisi slot M dalam satu *frame* tertentu. Laser akan membentuk pulsa-pulsa pada *slot time* yang sesuai untuk mewakili *word*. Pulsa laser lalu dikonversikan secara optis menjadi sekuen-sekuen yang telah ditentukan dengan memanfaatkan *parallel fiber optic delay line encoder*, seperti

pada gambar 4.24(b). Encoder ini mengkonversikan pulsa laser awal menjadi deretan pulsa-pulsa output tertentu. *Delay line* yang digunakan dipilih yang dapat memberikan jarak yang sesuai antarpulsa dalam sekuen. Semua sekuen pulsa harus dihasilkan sehingga menduduki *time slot* tunggal pada *frame* PPM. Karena itu, pulsa-pulsa laser harus lebih sempit dari satu *time slot*. Sekuen pulsa cahaya selanjutnya ditransmisikan melalui serat optik ke penerima yang dituju.

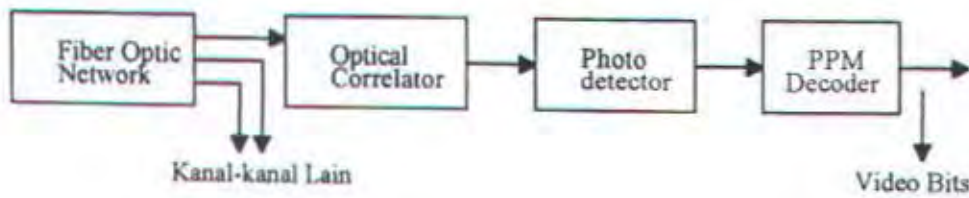


GAMBAR 4.24

TRANSMITTER LASER

(a) BLOK DIAGRAM

(b) ENKODER SEKUEN



GAMBAR 4.25
RECEIVER KANAL

Sejumlah *video encoder*, yang beroperasi secara asinkronus dan bersamaan, menghasilkan sekumpulan sekuen-sekuen yang memiliki selang waktu relatif satu sama lainnya. Gelombang cahaya dari semua sumber digabung menjadi satu di *fiber optic network* menjadi sinyal multipleks video, yang terdiri dari sekuen-sekuen individual secara acak dan kemungkinan mengalami *overlapping*.

Pada sisi penerima, seperti pada gambar 4.25, sebuah korelator optik (*matched optic correlator*) digunakan untuk mengenali kedatangan sekuen yang diinginkan. Korelator optik itu juga terdiri dari sekumpulan *fiber optic delay line*, yang inversif (merupakan invers) dari sekuen yang datang ke penerima. Bila sekuen pulsa optik yang diinginkan tiba di penerima dan melewati korelator, output intensitas cahaya akan men-*trace* fungsi korelasi dari sekuen tersebut, yang mencapai harga *peak* saat sekuen menduduki korelator sepenuhnya. Dengan mendeteksi (lewat photodetector) output dari korelator ini, tegangan *peak* dapat dideteksi dan ditempatkan relatif pada *frame marker* untuk selanjutnya mendekodekan *word PPM*.

IV. 6. 2. Penampilan Sistem

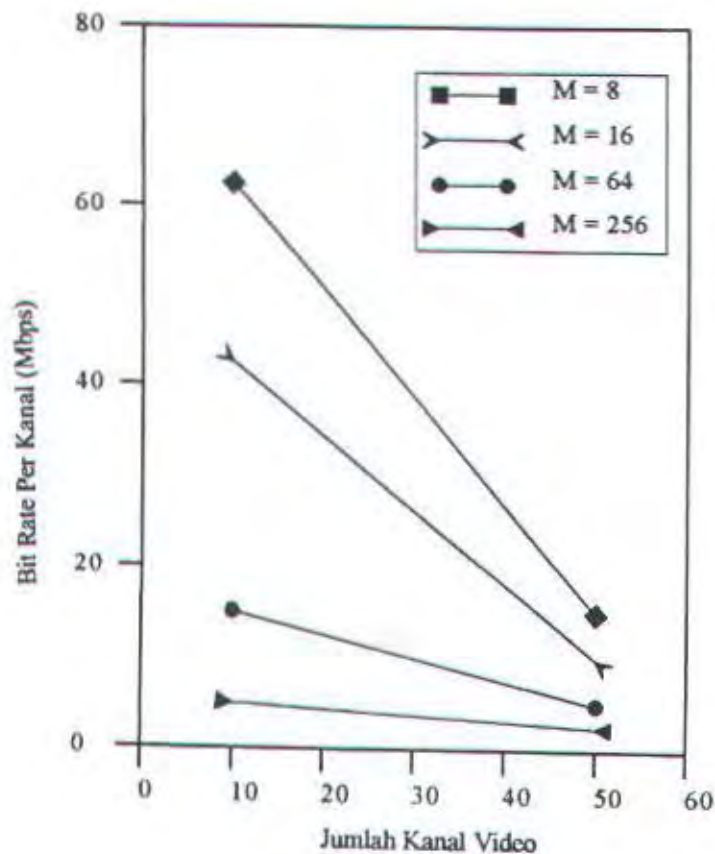
Bit rate yang mungkin dicapai untuk satu kanal CDMA sangat tergantung pada parameter-parameter PPM dan sekuen kode yang dipilih. Bila ditentukan M slot per *frame* PPM, setiap kanal akan memiliki *bit rate*, R_b :

$$R_b = \frac{\log M}{MT_s} \quad (4-66)$$

di mana T_s merupakan *slot time* yang dialokasikan. *Slot time* tersebut harus menampung *code length* sekuen, L , yang juga mesti cukup panjang untuk menyediakan ukuran kode yang dibutuhkan oleh N sumber video, seperti yang diberikan persamaan (4-65). Dengan lebar pulsa laser T_c detik, satu slot $T_s = LT_c$ detik, dan persamaan (4-66) menjadi :

$$R_b = \frac{\log M}{MLT_s} = \frac{2 \log M}{MNw(w-1)T_c} \quad (4-67)$$

Gambar 4.26 menunjukkan grafik *bit rate* kanal video versus jumlah kanal simultan N untuk ukuran *frame* PPM yang berbeda, dengan asumsi $T_c = 100$ ps dan bobot $w = 4$. Dari grafik tersebut terlihat bahwa penurunan *data rate* akan memperbesar ukuran *frame* PPM, namun laser lebih sering menghasilkan pulsa dengan harga M yang lebih kecil. Terlihat pula bahwa sekitar 25-50 sumber video yang independen dapat dimultipleks menjadi satu sinyal video terkompres tunggal yang memiliki *rate* sekitar 1-20 Mb/s, dengan harga M yang sesuai. Secara teoritis, *rate* ini dapat ditingkatkan secara langsung dengan menggunakan pulsa laser yang lebih sempit, namun perangkat keras yang dibutuhkan untuk menghasilkan pulsa lebih sempit dari 100 ps sangatlah mahal.



GAMBAR 4.26

BIT RATE ERROR VERSUS JUMLAH KANAL VIDEO UNTUK UKURAN FRAME PPM YANG BERBEDA

Elemen-elemen dari sistem yang dibutuhkan pada PPM CDMA ini sebenarnya dengan mudah dapat diimplementasikan dengan teknologi yang berkembang dewasa ini. Diode laser yang dipakai adalah yang dapat menghasilkan pulsa-pulsa sempit (dalam studi ini sekitar 100 ps) pada PPM encoder *frame rate* ($R_f / \log M$ frame/sekon). Panjang gelombang dan kontrol fase pada semburan cahaya tidak dibutuhkan, dengan kata lain, memang telah sesuai dengan panjang

gelombang serat optik itu sendiri. *Photodetector* di sisi penerima harus memberi respon pada pulsa-pulsa yang bersesuaian (*correlated pulses*), sekitar 200 ps, dan karena itu mesti memiliki lebar bidang 5 GHz. Untuk itu dapat digunakan *avalanche photodetector* (APD), karena sensitifitasnya terhadap noise sangat rendah pada lebar bidang ini. Sedangkan untuk encoder sekuen-sekuen dan korelator optik dipakai *fiber optic parallel delay lines combiner*, yang membutuhkan delay sekitar 1-10 ns.

IV. 6. 2. 1. Probability of Error

Untuk mendapatkan performansi yang diinginkan, pulsa laser mesti menghasilkan level power yang cukup untuk mengatasi *noise*, *crosstalk*, dan rugi-rugi pada jaringan CDMA di penerima. Karena pulsa laser tersebut mula-mula dibagi untuk setiap *delay line* dari encoder sekuen, dan selanjutnya direkombinasikan lagi untuk membentuk sekuen-sekuen pulsa, rugi daya pulsa sebesar $1/w^2$ secara langsung akan muncul selama proses pengkodean. Sekumpulan sumber gelombang cahaya lalu digabung untuk menghasilkan sinyal optik dan ditransmisikan melewati jaringan serat optik.

Output dari serat optik ini lalu dibagi (*splitting*) lagi ke dalam N serat terpisah dan diteruskan ke setiap terminal *decoding* video tunggal. Pada setiap terminal, sinyal cahaya dikorelasikan secara optis oleh *matched delay lines*, dengan delay yang mengacu pada sekuen yang diinginkan, dan dideteksi lewat

photodetector untuk proses *PPM decoding*. Rugi-rugi propagasi total dari output awal laser hingga input *photodetector* diberikan oleh persamaan :

$$\text{loss} = (1/w^4)(1/N)F_L \quad (4-68)$$

di mana suku pertama dari persamaan tersebut merupakan rugi-rugi *encoder-decoder split and combine*, $1/N$ adalah rugi-rugi *multiple access coupling*, sedangkan F_L menyatakan rugi-rugi transmisi pada serat optik. Jika P_s adalah daya laser rata-rata (laser average power), maka *peak pulse power*-nya setelah mengalami *M*-ary *PPM framing* adalah : $P_p = LMP_s$. Sehingga, daya pulsa input adalah :

$$P_i = P_p \times (\text{loss}) = P_s ML[F_L/Nw^4] \quad (4-69)$$

Korelator yang sesuai (*matched correlator*) akan menggabungkan bobot, w , dari sekuen pulsa yang benar untuk membentuk pulsa cahaya dengan daya wP_i . Karena kondisi dari kode-kode PSO, setiap sekuen *interfering* menghasilkan output korelasi tidak lebih dari P_i , yang terdistribusi secara acak dalam waktu relatif terhadap pulsa sinyal.

Untuk analisa performansi, pendekatan yang akurat untuk *bit error rate* diberikan oleh persamaan :

$$PE = (M/2)Q\left(\sqrt{\text{SNR}}/2\right) \quad (4-70)$$

di mana $Q(x)$ adalah integral *Gaussian* dan SNR merupakan *photodetected signal to noise ratio*, yang dapat ditulis :

$$\text{SNR} = \frac{(wK_s)^2}{wK_s + K_d + (N-1)K_i^2(1/NM)} \quad (4-71)$$

di mana K_s adalah jumlah pulsa sinyal terdeteksi (*photodetection*) per *chip time* sekuen terhadap daya P_p , K_d jumlah *noise* yang terakumulasi pada detektor per

chip time, dan suku akhir pada penyebut merupakan varian *crosstalk* yang diperoleh dengan merata-ratakan semua sumber dan lokasi pulsa. Bila daya laser ditingkatkan, PE pada persamaan (4-70) akan turun. Pada kondisi laser *high power* ($K_s \gg 1$), *noise* yang paling dominan adalah rugi-rugi *crosstalk*, sehingga perlu diperhitungkan dalam menghitung PE. Pada kondisi *high power*, persamaan (4-71) tidak tergantung pada K_s , dan PE pada persamaan (4-70) harus didekati dengan memperhitungkan rugi-rugi *crosstalk*. Sehingga persamaan yang lebih akurat dinyatakan dalam :

$$PE \cong \frac{M}{2} \left[\frac{1}{2} \binom{N-1}{w} \left(\frac{w^2}{ML} \right)^w \left(1 - \frac{w^2}{ML} \right)^{N-1-w} \right] \quad (4-72)$$

Persamaan di atas didasari pada kenyataan bahwa dengan sekuen-sekuen PSO, probabilitas *interfering transmitter* memberikan pulsa *crosstalk* pada *peak slot correlation* dari transmitter utama adalah w^2/ML . Karena *interfering transmitter* bisa sebanyak $N-1$, kuantitas yang di dalam kurung pada persamaan (4-72) mewakili probabilitas dari kejadian yang paling mungkin di mana terjadi kesalahan pendudukan *slot*. Penyebab utama terjadinya *symbol error* adalah diterimanya pulsa-pulsa dengan bobot w pada slot yang tidak tepat.

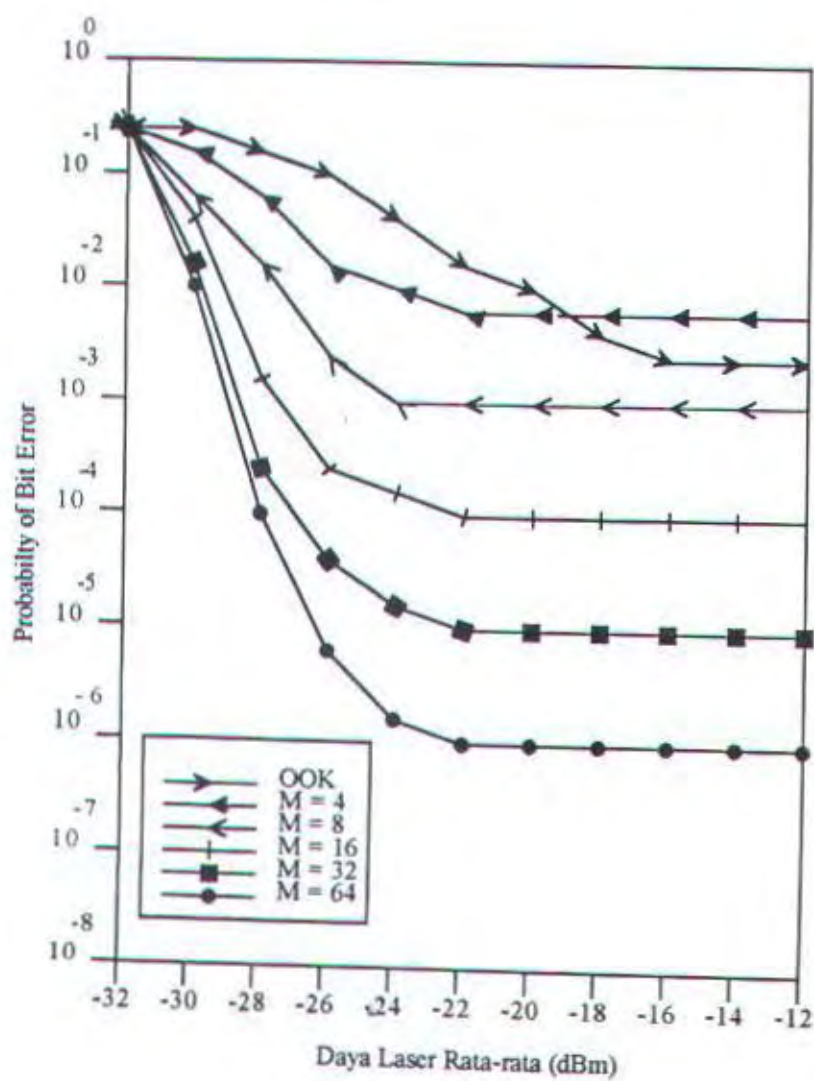
Gambar 4.27 menunjukkan grafik PE pada persamaan (4-70) dan (4-72) sebagai fungsi dari daya rata-rata laser (laser average power) untuk berbagai ukuran *frame* PPM dengan $w = 4$, $N = 8$ dan $N = 50$. Penerima yang dipakai (APD receiver) memiliki sensitivitas sekitar -33 dBm pada lebar pulsa (pulse time) 600 ps, dan diskala pada sensitivitas -27 dBm untuk lebar pulsa 100 ps. Persamaan (4-72) menunjukkan bahwa penambahan bobot kode, w , dan/atau ukuran *frame*

PPM, M , akan mengurangi harga PE. Yang lebih menarik, hasilnya hampir tak bergantung pada jumlah kanal, N . Hal ini dikarenakan oleh kenyataan bahwa bila varian *crosstalk* meningkat sebagaimana jumlah kanal $N - 1$, maka dibutuhkan *code length* yang lebih besar, karena itu sejumlah N kanal menghasilkan efek rata-rata pada persamaan (4-72) yang mengurangi pengaruh *crosstalk*.

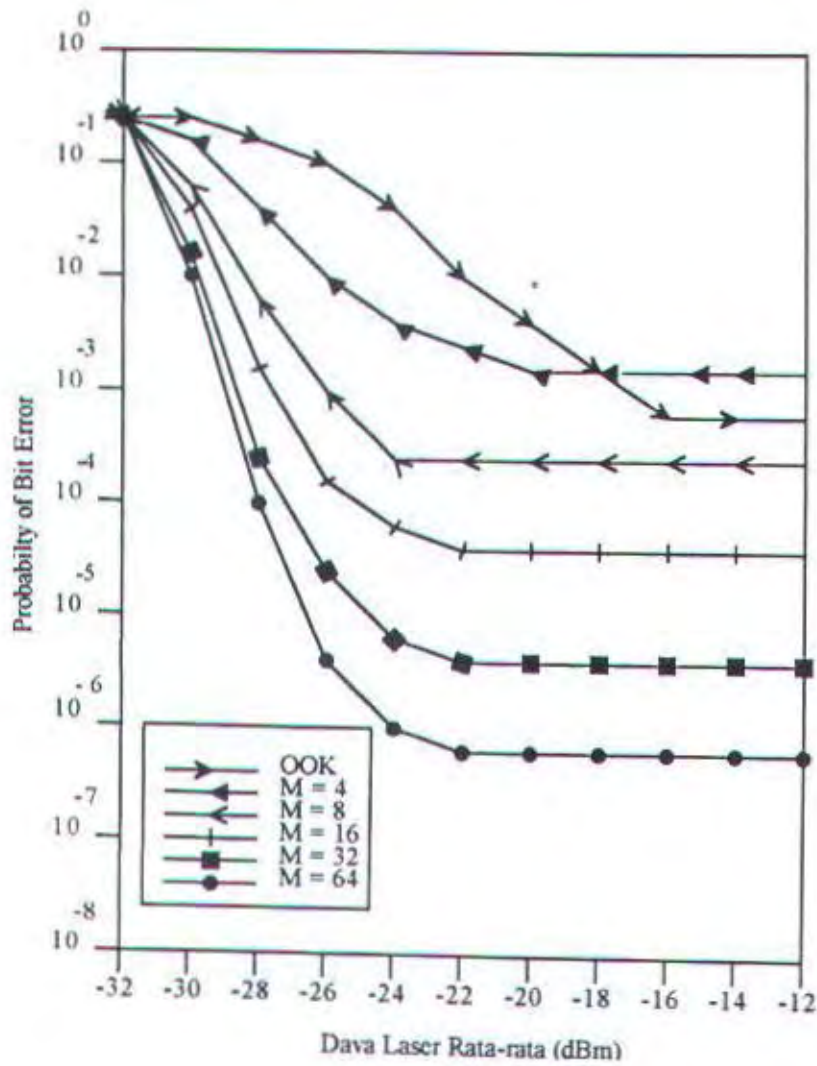
Kurva pada gambar tersebut secara implisit juga menyatakan bahwa laser menghasilkan daya pulsa yang ML kali lebih besar dari daya laser rata-rata yang ditunjukkan.

Pada gambar 4.27 juga ditunjukkan harga PE yang akan diperoleh bila menggunakan link *ON-OFF keyed* (OOK) CDMA yang dioperasikan pada level daya yang sama dan penerima yang sama pula. Terlihat bahwa PE sistem dengan PPM lebih baik dibandingkan dengan sistem yang menggunakan modulasi OOK. Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa proses pengkodean PPM menyebarkan (*spread*) lokasi-lokasi pulsa dalam daerah waktu, sehingga mengurangi terjadinya *crosstalk overlap*.

Dari grafik tersebut dapat diketahui, untuk mendapatkan *bit rate* sekitar 10^6 dibutuhkan ukuran *frame* PPM dengan $M = 64$. Harga M sebesar ini memungkinkan sinyal video terkompres memiliki *rate* sekitar 5-10 Mb/s, di mana kecepatan bit sebesar ini sangat baik untuk ukuran kualitas TV. Dengan memanfaatkan perangkat *electronic processing*, ukuran *frame* PPM sebesar ini bisa didapat relatif lebih mudah.



(a)



(b)

GAMBAR 4.27

BIT ERROR PROBABILITY VERSUS DAYA LASER RATA-RATA

(a) $N = 8, W = 4$ (b) $N = 50, W = 4$

IV. 7. Analisa dan Perbandingan Teknik-teknik Multipleks Optical CDMA

Untuk menentukan teknik *optical* CDMA mana yang akan digunakan sebagai metode multipleks dalam suatu sistem komunikasi serat optik, maka perlu diketahui keuntungan dan kerugian dari teknik-teknik tersebut. Karena itu dibutuhkan analisa dan perbandingan dari beberapa teknik *optical* CDMA yang telah dibahas.

OOC CDMA, sebagaimana telah dijelaskan, menggunakan kode optik ortogonal untuk pengkodeannya, yakni kode unipolar yang memiliki sifat autokorelasi dan korelasi silang yang baik.

Secara umum penampilan sistem OOC CDMA ini sangat tergantung pada jumlah pulsa dalam sekuen yang dipakai (*chip per frame*, F) dan *level threshold* pada detektor di penerima. Dengan kata lain untuk meningkatkan penampilan sistem salah satunya dapat dilakukan dengan menambah jumlah *chip per frame*, F , serta meningkatkan *level threshold* hingga sama dengan bobot dari kode yang dipakai (K).

Penampilan sistem yang diberikan sangat bervariasi tergantung pada kondisi yang dipenuhi oleh OOC CDMA. Untuk kasus A (*upperbound*) dengan jumlah user $N=20$, bobot kode $K=5$ dan $F=1000$ serta *level threshold* mendekati 5 diperoleh probabilitas kesalahan (PE) terbaik mendekati 10^{-6} . Namun bila $F=2000$ PE menunjukkan perbaikan hingga melebihi 10^{-7} . Untuk jumlah user $N=10$ dengan ukuran chip frame yang tetap $F=1000$, dan *level threshold* sama dengan nilai K , bila

K=1 sistem OOC CDMA memberikan PE sekitar 10^{-3} , untuk K=3 PE sekitar 10^{-6} , bila K=5 PE mendekati 10^{-8} , untuk K=7 PE menjadi 10^{-10} , sedangkan untuk K=9 PE hampir mencapai 10^{-13} . Masih untuk kasus A bila F=1000 dan K=5 serta level threshold juga 5, untuk jumlah user N=10 menghasilkan PE mendekati 10^{-8} , dan untuk N=30 PE menurun hingga 10^{-5} , sedangkan bila jumlah user semakin besar hingga N=50 PE semakin menurun mendekati 10^{-4} . Untuk kasus B (lower bound) dengan jumlah user tetap N=10 dan F=1000, dan level threshold mengikuti nilai K, untuk K=1 memberikan PE sekitar 10^{-5} , bila K=3 menghasilkan PE di atas 10^{-7} , untuk K=5 PE melebihi 10^{-10} dan nilai K=9 memberikan PE sekitar 10^{-15} . Variasi probabilitas kesalahan di atas menunjukkan bahwa penampilan sistem OOC CDMA sangat bergantung pada jumlah user N, ukuran chip per frame F, dan bobot kode optik ortogonal yang dipakai K, serta level threshold detektor di penerima.

Keterbatasan dari OOC CDMA ini adalah tuntutan akan nilai autokorelasi dan korelasi silang yang sangat ketat, sehingga membatasi jumlah user yang dapat ditampung. Jadi untuk mendapatkan jumlah user yang besar dibutuhkan *codeword* yang besar pula, sehingga *code length* F, harus sangat besar pula. Bila OOC dengan F yang sangat besar akan sulit menyediakan *encoder*-nya.

Keuntungannya adalah, sinyal-sinyal interferensi yang dapat menurunkan penampilan sistem dapat ditekan dengan memasang *optical hard limiter* sebelum *optical tapped delay line* pada penerima. Selain itu penggunaan *hard limiter* ini juga dapat menampung jumlah user sampai lima kali lebih banyak dari OOC CDMA yang tidak memakai *hard limiter*.

Untuk kasus A dengan $N=50$, $F=1000$ dan $K=5$, OOC CDMA tanpa *hard limiter* memberikan PE terbaik sekitar 10^{-4} , sedangkan dengan menggunakan *hard limiter* PE terbaik dapat dicapai sekitar 10^{-5} . Untuk kasus B dengan $F=1000$, $K=5$, dan $N=10$ PE terbaik yang diberikan OOC CDMA tanpa *hard limiter* sekitar 10^{-10} dan yang diberikan OOC CDMA dengan *hard limiter* adalah sekitar 10^{-15} . Untuk $N=50$ OOC CDMA tanpa *hard limiter* menghasilkan PE terbaik sekitar 10^{-5} sedangkan yang memanfaatkan *hard limiter* memberikan PE terbaik sampai 10^{-10} . Jadi jelaslah bahwa penggunaan *hard limiter* pada teknik multipleks OOC CDMA mampu meningkatkan penampilan sistem dan menampung jumlah user lebih banyak sekitar lima kalinya.

Pada *random carrier* CDMA (RC CDMA), setiap sinyal dengan *carrier* yang berbeda disebarkan atau mengalami proses *spreading* hingga hanya menduduki lebar bidangnya saja. Lalu *spread bandwidth* inilah yang akan dilewatkan pada kanal serat optik. Hal inilah yang membedakan RC CDMA dengan teknik *optical* CDMA yang lainnya. Di mana pada *optical* CDMA yang lain setiap stasiun (user) menggunakan gelombang pembawa yang sama. Selain itu RC CDMA juga memanfaatkan metode deteksi koheren.

Kerugian metode deteksi koheren pada jaringan berbasis serat optik saat ini adalah masih sulit untuk merealisasikannya sehingga menyebabkan harga perangkat *hardware*-nya menjadi sangat mahal. Namun aplikasi metode deteksi koheren ini memberikan keuntungan tersendiri, yaitu dapat meningkatkan sensitivitas penerima

hingga 20-30 dB. Kelemahan lainnya dari RC CDMA yakni efesiensi spektrumnya yang tergolong rendah, sehingga membutuhkan daya yang lebih besar.

Dari sisi jumlah user yang dapat ditampung serta penampilan sistemnya, RC CDMA ternyata cukup menjanjikan. Dengan menggunakan serat optik *single mode* yang berkapasitas sekitar 10 THz (10000 GHz), RC CDMA telah mampu menampung puluhan ribu user dengan data rate sekitar 10 Mbit/s. Dengan CNR 10,5 dB dan probabilitas kesalahan 10^{-8} , RC CDMA mampu menampung sekitar 17000 stasiun sedangkan untuk probabilitas kesalahan 10^{-4} jumlah user yang mampu ditampung bisa mencapai angka di atas 30000. Bahkan bila kecepatan proses *hardware*-nya bisa ditingkatkan hingga 4 Gbit/s probabilitas kesalahannya bisa mencapai 10^{-16} dan 10^{-8} . Dengan begitu terlihat bahwa, di masa mendatang bila kecepatan proses dari *hardware* dapat lebih ditingkatkan probabilitas kesalahan RC CDMA akan berkurang secara substansial, dengan kata lain penampilan sistemnya bisa jauh lebih baik.

Bipolar Code CDMA (BC CDMA) pada dasarnya memiliki kemiripan dengan OOC CDMA. Hanya saja BC CDMA ini, sesuai dengan namanya, memanfaatkan kode bipolar untuk pengkodeannya, yaitu kode yang mengandung kedua unsur positif dan negatif $[-1,1]$. Pada BC CDMA ini kode bipolar yang dipakai adalah kode gold.

Biasanya kode bipolar dipakai untuk komunikasi optik dengan deteksi koheren. Padahal BC CDMA sendiri dalam metode deteksinya menggunakan metode deteksi langsung atau *direct detection*. Hal ini membuat BC CDMA amat

rentan dengan interferensi. Untuk itu digunakan *optical filter* di sisi penerima untuk menolak sinyal interferensi yang ada. Selain itu, akibat penggunaan kode bipolar ini dibutuhkan sinkronisasi waktu antara pasangan pemancar dan penerima.

Keunggulan teknik BC CDMA ini hanya terletak pada kemudahan pengkodeannya saja karena menggunakan kode-kode bipolar. Artinya kombinasi sekuen-sekuennya dapat lebih banyak dan mudah sehingga dapat mewakili banyak user. Pemakaian kode bipolar itu sendiri sebenarnya akibat ketiadaan kode-kode unipolar sebelumnya untuk diaplikasikan pada komunikasi optik *direct detection*.

Penampilan sistem yang diberikan juga tergantung pada panjang kode, N , jumlah user dan *level threshold* detektor di penerima. Untuk panjang kode $N=127$ PE terbaik diberikan pada *level threshold* 0.5, di mana bila jumlah user aktif 4 akan memberikan PE sekitar 10^{-9} , sedangkan untuk jumlah user aktif 5 PE mendekati 10^{-6} serta untuk user aktif 8 PE turun mendekati 10^{-4} . Bila panjang kode ditambah menjadi $N=255$, dengan PE sekitar 10^{-6} dapat menampung sebanyak 12 user aktif. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *code length* menjadi dua kali lipat akan mampu menambah jumlah user yang bisa ditampung menjadi hampir dua kali lipat pula. Secara umum, bila dibandingkan dengan OOC CDMA, penampilan sistem BC CDMA ini tidak sebaik OOC CDMA.

Pulse position modulation CDMA (PPM CDMA) juga merupakan salah satu teknik *optical* CDMA yang *direct detection*. Hanya saja, bila teknik *optical* CDMA lainnya memanfaatkan metode modulasi OOK, PPM CDMA sesuai namanya menggunakan metode modulasi PPM atau modulasi pulsa posisi.

Keuntungan utama dari modulasi PPM ini adalah sifatnya yang dapat mengurangi *crosstalk* kanal dan cukup hemat daya (power). Selain itu dalam komunikasi serat optik format sinyal PPM ini mudah untuk diimplementasikan.³⁷ Selain itu tak ada keunggulan yang berarti yang dapat diberikan oleh teknik PPM CDMA ini.

Kerugian dari sistem ini adalah keterikatannya pada kode optik yang dipakai, seperti pada OOC CDMA. Untuk jumlah user yang besar dibutuhkan kode optik ortogonal yang *codeword*-nya besar pula, dan *codeword* yang terlalu besar akan menurunkan bit rate per kanal. Sebenarnya keterbatasan ini dapat diatasi dengan menggunakan pulsa laser yang cukup sempit sekitar 100 ps, namun membutuhkan biaya yang sangat mahal.

Penampilan sistem PPM CDMA ini secara umum ditentukan oleh jumlah user, bobot kode yang dipakai dan daya laser rata-rata. Sedangkan bit rate per kanal sangat ditentukan oleh jumlah user yang ditampung. Untuk ukuran *frame* PPM $M=256$ terlihat bahwa 10 user yang ditampung memberikan bit rate 5 Mbps, bila jumlah user ditambah hingga mencapai 50 maka bit rate-nya akan turun hingga sekitar 1 Mbps. Sedangkan untuk jumlah user $N=8$ dan bobot kode $W=4$ penampilan sistem terbaik diberikan oleh ukuran *frame* $M=64$ yaitu PE sekitar 10^{-6} dengan daya laser rata-rata di atas -24 dBm. Untuk jumlah user $N=64$ dan bobot kode yang sama ternyata PE-nya menjadi lebih baik yaitu sedikit di atas 10^{-6} . Namun penambahan jumlah user ini akan menurunkan bit rate per kanal.

³⁷ Hossam M. H. Shalaby, *Performance Analysis of Optical CDMA Communication systems with PPM Signalling*, Department of Electrical Engineering, University of Alexandria, hal. 1.

TABEL 4.1
PERBANDINGAN JENIS-JENIS OPTICAL CDMA

NO	KARAKTERISTIK	OOC CDMA	RC CDMA	BC CDMA	PPM CDMA
1	Tipe Modulasi	OOK	OOK	ASK	PPM
2	Kode Optik	OOC	PN	Kode Gold	OOC
3	Decoder-Encoder	Delay Line	Ladder Network	Delay Line	Delay Line
4	Probabilitas Error	10^{-10}	10^{-8}	$10^{-5} - 10^{-13}$	10^{-6}
5	Jumlah User	50	17,000	6-12	25-50
7	Metode Deteksi	Direct Detect	Koheren	Direct Detect	Direct Detect
8	Konsumsi Daya	Normal	Lebih Besar	Normal	Lebih Hemat

Perbandingan dari beberapa teknik *optical* CDMA, secara umum disajikan pada tabel 4.1. Pada tabel di atas, jumlah user dan probabilitas kesalahan bukanlah nilai yang eksak yang diberikan oleh sebuah sistem teknik *optical* CDMA, melainkan merupakan pilihan dari beberapa variasi yang ada.

Setelah membahas aplikasi teknik multipleks CDMA dalam sistem komunikasi serat optik, selanjutnya pada bab V berikut, akan disimpulkan hasil studi pengkajian dari tugas akhir ini.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V. 1. Kesimpulan

Dari pembahasan tugas akhir Studi Tentang Aplikasi Teknik Multipleks CDMA dalam Sistem Komunikasi Serat Optik ini dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Dibandingkan dengan metode multipleks untuk sistem komunikasi serat optik lainnya, *optical* CDMA memiliki beberapa keunggulan, antara lain : pengaksesan dapat secara *asynchronous* dan random, kecepatan data tinggi, jaminan sekuriti yang lebih baik dan kemampuan menampung jumlah *user* yang lebih banyak.
2. Dari beberapa teknik *optical* CDMA, secara umum penampilan sistem yang diberikan cukup baik terutama OOC CDMA, RC CDMA dan PPM CDMA. Dari segi penampungan *user* dalam jaringan, RC CDMA mampu menampung hingga puluhan ribu jumlah *user* dengan penampilan sistem yang cukup baik.
3. Untuk membangun suatu sistem *optical* CDMA dibutuhkan unsur-unsur teknis utama yang mendukungnya, antara lain : pasangan *encoder-decoder* dan deret/sekuen kode optik yang digunakan.
4. Sekuen-sekuen kode yang digunakan dalam sistem *optical* CDMA harus dapat dengan mudah dibedakan dari versi pergeseran sekuen itu sendiri dan deret yang lain dalam satu set sekuen.

5. Beberapa kode optik yang dapat dipakai dalam *optical* CDMA, antara lain :
kode optik ortogonal, kode gold dan kode utama. Namun yang biasa dipakai dan memberikan hasil terbaik adalah kode optik ortogonal dan kode utama.

V. 2. Saran

Karena teknik *optical* CDMA ini baru dikembangkan, maka bentuk-bentuk *optical* CDMA baru selain yang telah dibahas dalam tugas akhir ini masih terus akan muncul. Untuk itu perlu diadakan studi pengkajian lagi terhadap bentuk-bentuk *optical* CDMA yang baru sehingga dapat dibandingkan dengan yang telah ada. Selain itu, juga dirasa perlu untuk membuat standarisasi teknis agar realisasi *optical* CDMA dalam bentuk perangkat kerasnya dapat lebih mudah dan seragam.

DAFTAR PUSTAKA

1. Andrew S. Holmes and Richard R. A. Syms, *All-Optical CDMA Using "Quasi Prime" Codes*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 10, NO. 2, February, 1992.
2. D. Zaccarin, M. Kavehrad, *Performance Evaluation of Optical CDMA Systems Using Non-Coherent Detection and Bipolar Codes*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 12, NO. 1, January, 1994.
3. Dixon, Robert C., *Spread Spectrum Systems*, Second Edition, New York : John Wiley & Sons, Inc., 1984.
4. Fan R. K. Chung, Jawad A. Salehi, Victor K. Wei, *Optical Orthogonal Codes : Design, Analysis, and Applications*, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 35, No. 3, May, 1989.
5. G. A. Cooper and C. D. Gillem, *Modern Spread Spectrum*, Singapore : McGraw-Hill Book Co., 1988.
6. Gerard J. Foschini, Giovanni Vannucci, *Using Spread-Spectrum in a High-Capacity Fiber-Optic Local Network*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 6, NO. 3, March, 1988.
7. Hecht, Jeff, *Understanding Fiber Optics*, Second edition, Indianapolis : Sams Publishing, 1996.
8. Jawad A. Salehi, Charles A. Brackett, *Code Division Multiple Access Techniques in Optical Fiber Networks-Part II : Systems Performance Analysis*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 37, No. 8, August, 1989.
9. Kao, Charles K., *Optical Fiber systems : Technology, Design and Application*, New York : McGraw-Hill Book Company, 1982.
10. Keiser, Gerd, *Optical Fiber Communications*, Second Edition, Singapore : McGraw-Hill, Inc., 1991.
11. Marhic, Michel E., *Coherent Optical CDMA Network*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 11, NO. 5/6, May, 1993.
12. Robert M. Gagliardi, Antonio J. Mendez, Mark R. Dale, Eugene Park, *Fiber-Optic Digital Video Multiplexing Using Optical CDMA*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 11, NO. 1, January, 1993.
13. Salehi, Jawad A., *Code Division Multiple Access Techniques in Optical Fiber Networks-Part I : Fundamental Principles*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 37, No. 8, August, 1989.
14. Salehi, Jawad A., *Emerging Optical Code-Division Multiple Access Communications systems*, IEEE Network Magazine, March, 1989.
15. Shallaby, Hossam M. H., *Performance Analysis of Optical CDMA Communications Systems with PPM Signalling*, Department of Electrical Engineering, University of Alexandria.

16. Shicci Tamura, Shiegenori Nakano, Kozo Okazaki, *Optical Code-Multiplex Transmission by Gold Sequences*, Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-3, NO. 1, February, 1995.
17. Svetislav V. Maric, et. al, *A New Family of Optical Code Sequence for Use in Spread Spectrum Fiber Optic Local Area Networks*, IEEE Transaction on Communications, Vol. 41, No. 8, August, 1993.
18. X. Steve Yao, Jack Feinberg, Ron Logan, and Lute Maleki, *Limitations on Peak Pulse Power, Pulse Width, and Coding Mask Misalignment in a Fiber-Optic Code-Division Multiple-Access Systems*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 11, NO. 5/6, May/June, 1993.

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO ITS

EE 1799 TUGAS AKHIR (6 SKS)

Nama Mahasiswa : KHAIRUL MUNADI
Nomor Pokok : 2902201508
Bidang Studi : TEKNIK TELEKOMUNIKASI
Tugas Diberikan : September 1994
Tugas Diselesaikan : Maret 1995
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Agus Mulyanto, M.Sc
Judul Tugas Akhir :

STUDI TENTANG APLIKASI TEKNIK MULTIPLEKS CDMA
DALAM SISTEM KOMUNIKASI SERAT OPTIK

Uraian Tugas Akhir

Dewasa ini, aplikasi serat optik sebagai saluran transmisi dalam sistem komunikasi telah berkembang begitu pesat. Selaras dengan perkembangan itu, teknik multipleks -yang memungkinkan pengiriman pelbagai informasi secara simultan dalam satu saluran transmisi- untuk sistem komunikasi optik pun semakin banyak muncul.

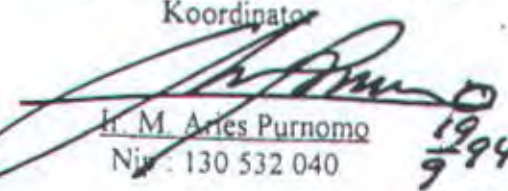
Salah satu metode multipleks yang baru dikembangkan saat ini adalah teknik CDMA (Code Division Multiple Access). Pada CDMA, setiap pemancar mengkodekan informasinya secara unik dan setiap penerima yang dituju memiliki kode komplementer untuk mendapatkan sinyal yang dibutuhkan. Dengan demikian, dapat diperoleh sejumlah pasangan pemancar-penerima yang bisa berkomunikasi melalui serat optik yang sama.

Dalam tugas akhir ini akan dibahas prinsip-prinsip dari teknik CDMA dan aplikasinya dalam sistem komunikasi serat optik.

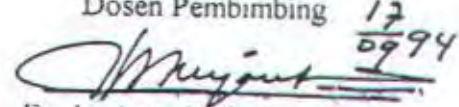
Surabaya, 15 September 1994

Menyetujui

Bidang Studi Teknik Telekomunikasi
Koordinator

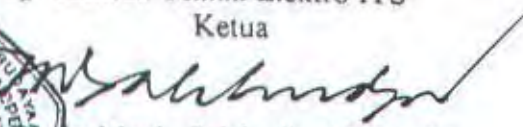

H. M. Aries Purnomo
Nip : 130 532 040

Dosen Pembimbing


Dr. Ir. Agus Mulyanto, M.Sc
Nip : 130 422 813

Mengetahui

Jurusan Teknik Elektro ITS
Ketua


Dr. Ir. Moch. Salehudin, M.Eng.Sc
Nip: 130 532 026



USULAN TUGAS AKHIR

A. JUDUL TUGAS AKHIR : STUDI TENTANG APLIKASI TEKNIK MULTIPLEKS CDMA DALAM SISTEM KOMUNIKSI SERAT OPTIK.

B. RUANG LINGKUP :
- DASAR SISTEM KOMUNIKASI
- SISTEM KOMUNIKASI
- SISTEM KOMUNIKASI OPTIK
- TEKNIK JARINGAN TELEKOMUNIKASI

C. LATAR BELAKANG : Teknik multipleks telah memungkinkan pengiriman berbagai informasi secara simultan dalam satu saluran transmisi. Dalam sistem komunikasi serat optik, salah satu teknik multipleks yang baru dikembangkan adalah metode CDMA (Code Division Multiple Access). Bila dibandingkan dengan sistem multipleks yang lain, CDMA memiliki beberapa keunggulan, antara lain: pengaksesan dapat secara asinkron dan random, kecepatan data tinggi, dan jaminan sekuriti yang lebih baik. Karena itu perlu dikaji lebih mendalam aplikasi teknik multipleks CDMA dalam sistem

komunikasi serat optik, sehingga dapat diperoleh gambaran yang lebih jelas tentang keandalannya, dan untuk selanjutnya bisa dijadikan sebagai teknik multipleks alternatif dalam perencanaan berbagai sistem komunikasi serat optik.

D. PENELAAHAN STUDI : Membahas mengenai teknik CDMA (Code Division Multiple Access) yang dipakai dalam sistem komunikasi serat optik. Juga membahas dan membandingkan beberapa teknik multipleks lain yang dipakai dalam sistem komunikasi serat optik.

E. TUJUAN : Memberi gambaran tentang aplikasi teknik multipleks CDMA dalam sistem komunikasi serat optik dengan berbagai keuntungan dan keterbatasannya.

F. LANGKAH-LANGKAH :
1. Studi literatur
2. Pengumpulan dan pengolahan data
3. Pembahasan dan perumusan kesimpulan
4. Penulisan laporan

G. JADWAL KEGIATAN

KEGIATAN	BULAN KE-					
	I.	II	III	IV	V	VI
Studi Literatur						
Pengumpulan dan Pengolahan Data						
Pembahasan dan Perumusan Kesimpulan						
Penulisan Laporan						

H. RELEVANSI

Melalui studi ini diharapkan dapat menunjang aplikasi sistem multipleks CDMA dalam sistem komunikasi serat optik, khususnya di Indonesia, di masa-masa mendatang.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

a. Identitas Penulis



Nama	: Khairul Munadi
Tempat/Tgl Lahir	: Aceh Besar, 27-08-1971
Agama	: Islam
Alamat	: Jl. Gebang Putih 14, Sby
Nama Ayah	: Drs. Anwar Hamzah
Nama Ibu	: Mariani
Alamat	: Perumahan DPRD Jl. Sultan Hasanuddin Sabang - Aceh

Penulis adalah putra pertama dari enam bersaudara.

b. Riwayat Pendidikan

1. SD Negeri 2 dan Madrasah Ibtidaiyah Negeri Sabang, lulus tahun 1984.
2. SMP Negeri 1 Sabang, lulus tahun 1987.
3. SMA Negeri 3 Banda Aceh, lulus tahun 1990.
4. Diterima di Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS pada tahun 1990.

c. Pengalaman Organisasi

1. Ketua Unit Kegiatan Catur ITS periode 1994/1995.

d. Pengalaman Kerja

1. Kerja Praktek I, di TVRI Stasiun Banda Aceh, tahun 1994.
2. Kerja Praktek II, di Armada Timur Surabaya, tahun 1995.
3. Tentor pada LBB Canalis Surabaya, 1994-1995.
4. MIS/Telecommunications Department, PT. Freeport Indonesia Company, Tembagapura-Irian Jaya, 1995-1996.